

CROSS COUPLED ADAPTIVE CONTROL UNTUK MENINGKATKAN CONTOURING ACCURACY PADA CNC MULTIAxis

Nama : Erza Handi Satyawan
Pembimbing I : Ir. Ali Fatoni, M.T.
Pembimbing II : Imam Arifin, S.T.,M.T.

ABSTRAK

Pada aplikasi kerja mesin CNC, kesalahan kontur yang terjadi merupakan akumulasi kesalahan dari tiap *axis* yang diakibatkan oleh pengaturan posisi antar *axis* yang tidak sinkron dan *tracking* kontur yang tidak akurat yang disebabkan oleh perubahan parameter *plant* karena adanya dinamisasi sistem. Pada konsep pengaturan CNC, sinkronisasi pengaturan antar *axis* dilakukan dengan cara meminimalkan kesalahan kontur dan modifikasi posisi referensi. Pada Tugas Akhir ini diajukan metode kombinasi *Cross Coupled Control* (CCC) dan *Model Referenced Adaptive Control* (MRAC) yang selanjutnya disebut dengan metode *Cross Coupled Adaptive Control*. Metode CCC berfungsi untuk melakukan sinkronisasi pengaturan antar *axis*. Metode CCC tersusun atas kontroler PID yang digunakan pada kontroler tiap *axis* dan kontroler PI yang digunakan untuk melakukan reduksi kesalahan kontur. Untuk mengatasi permasalahan parameter *plant* yang berubah, digunakanlah kontrol adaptif MRAC yang berguna untuk memperbarui nilai parameter kontroler PID dengan disesuaikan terhadap kondisi sistem. Pengujian dari Tugas Akhir ini adalah pembentukan kontur dengan toleransi 0,2 cm. Nilai RMSE yang dihasilkan pada pembentukan kontur linier dan lingkaran memiliki nilai minimal 0,0354 dan 0,1203 dan nilai maksimal 0,0694 dan 0,1233 Hasil dari pengujian Tugas Akhir ini menunjukkan bahwa mesin CNC mampu menghasilkan kontur yang lebih baik dibandingkan dengan metode kontrol CCC dan MRAC.

Kata Kunci : *Cross Coupled Adaptive Control*, *Cross Coupled Control* (CCC), *Model Referenced Adaptive Control* (MRAC), PID.

Halaman ini sengaja dikosongkan

CROSS COUPLED ADAPTIVE CONTROL FOR IMPROVING CONTOURING ACCURACY ON MULTIAXIS CNC

Name : Erza Handi Satyawan
Advisor I : Ir. Ali Fatoni, M.T.
Advisor II : Imam Arifin, S.T.,M.T.

ABSTRACT

On the application of CNC machine work , the contour error occurs an accumulation of errors caused by each axis position adjustment between the axis out of sync and inaccurate contour tracking caused by changes in plant parameters due to the dynamics of the system. On the concept of CNC setup , synchronization between the axis setting is done by minimizing errors and modifications contour reference position . In this final project, combination method composed of Cross Coupled Control (CCC) and Model Referenced Adaptive Control (MRAC) hereinafter referred to as the method of Cross Coupled Adaptive Control has been proposed. CCC method is used to synchronize the settings between axis . CCC method composed of a PID controller is used on each axis controller and PI controller is used to perform the contour error reduction . To overcome the problem of changing plant parameters, MRAC as an adaptive control is useful to update the value of the PID controller with adjustable parameters of the system conditions . Testing of this final project is the establishment of tolerance contours to 0.2 cm . RMSE values resulting in the formation of linear and circular contour has a minimum value of 0.0354 and 0.1203 and a maximum value of 0.0694 and 0.1233 Final Results of the testing showed that the CNC machine capable of producing contour better than the control method CCC and MRAC.

Keyword : *Cross Coupled Adaptive Control, Cross Coupled Control (CCC), Model Referenced Adaptive Control (MRAC), PID.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJUAN PUSTAKA

2.1. CNC Milling

Mesin CNC adalah suatu mesin perkakas yang mampu melakukan proses pembentukan benda dengan mekanisme kontrol melalui komputer dengan menggunakan bahasa numerik (data perintah dengan kode angka, huruf dan simbol) sesuai standar ISO. Mesin CNC banyak digunakan pada industri manufaktur dalam proses produksi yang membutuhkan kepresisian yang sangat tinggi. Mesin CNC memiliki dua atau lebih arah gerakan *tool* yang disebut dengan sumbu atau *axis* dan satu mata pahat penyayat yang terpasang yang berputar. Dalam melakukan proses pemahatan dengan mesin CNC, perlu dilakukan pemrograman kontur yang ingin dihasilkan dengan menggunakan *G-Code*. Setelah dilakukan pemrograman, dilakukanlah pembentukan kontur tersebut dengan cara melakukan kombinasi putaran mata pahat dan pergerakan posisi *axis*. Gambar 2.1 menunjukkan prototipe mesin CNC *milling*.



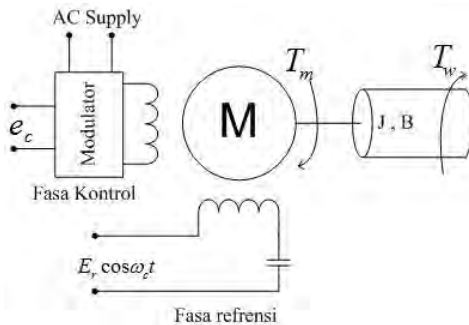
Gambar 2.1. *CNC Miliing*

CNC *milling* adalah jenis mesin CNC yang dapat mencetak pola tertentu pada suatu permukaan benda kerja yang dapat diprogram pada tiga sumbu, yaitu sumbu X dan Y untuk mengontrol posisi dari benda pahat dan sumbu Z untuk mengontrol gerakan vertikal. Pada Tugas

Akhir ini, akan dibuat program simulasi pengaturan posisi *axis* X dan Y yang merepresentasikan sistem kerja mesin CNC *milling*.

2.2. Motor Servo AC [6]

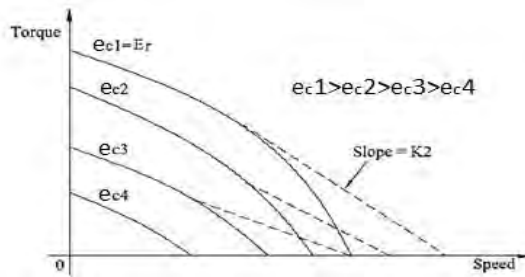
Pada Tugas Akhir ini, akan dilakukan simulasi metode *Cross Coupled Adaptive Control* pada mesin CNC *milling* yang menggunakan aktuator motor *servo* AC. Pemodelan motor *servo* AC menggunakan referensi pada *paper* "*Position Tracking Performance of Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*" karya M. Vijayakarthick dan P.K Bhaba. Motor *servo* AC merupakan motor AC 2 fasa yang terdiri dari satu fasa sebagai fasa referensi dan satu fasa kontrol. Struktur motor *servo* AC ditunjukkan pada Gambar 2.2 [6]. Sumber tegangan AC masuk ke dalam fasa kontrol. Sumber tegangan ini kemudian dimodulasi dengan tegangan kontrol (e_c), tegangan kontrol didapatkan dari sinyal kesalahan pada sistem umpan balik. Sedangkan tegangan masukan pada fasa referensi adalah $E_r \cos \omega_c t$.



Gambar 2.2. Struktur Motor Servo AC

Motor *servo* AC menghasilkan torsi yang dinotasikan dengan T_m , torsi ini mendapat gangguan yang berlawanan arah oleh torsi gangguan T_w . Motor kemudian menggerakkan beban. Pada beban motor, terdapat parameter B dan J.

Model sistem tersusun atas motor yang dengan *couple* pada *gear box* dan beban inersia yang terpasang pada *shaft* motor. Berdasarkan pada kurva torsi-kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, torsi yang dihasilkan dapat ditulis pada Persamaan (2.1) :



Gambar 2.3. Kurva Torsi-Kecepatan Motor Servo AC

$$T_m = K_1 e_c(t) - K_2 \dot{\theta}(t) \dots \dots \dots (2.1)$$

Beban motor dipengaruhi oleh momen inersia J dan koefisien gesekan B sehingga persamaan beban pada motor menjadi $J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_w$ sehingga persamaan Motor AC Servo secara keseluruhan dapat ditulis :

$$k_1 e_c(t) = J\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + T_w + k_2 \dot{\theta}(t) \dots \dots \dots (2.2)$$

$$T_m = k_1 e_c(t) - k_2 \dot{\theta}(t) = J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_w \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

K_1 & K_2 = Konstanta motor (Nm/V, Nm/rad.s⁻¹)

θ = Posisi sudut motor AC servo (rad)

$\dot{\theta}$ = Kecepatan sudut motor AC servo (rad/s)

$\ddot{\theta}$ = Percepatan sudut motor AC servo (rad/s²)

Apabila dilakukan transformasi Laplace, maka Persamaan (2.3) menjadi:

$$k_1 e_c(s) - k_2 \cdot s \cdot \theta(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + B \cdot s \cdot \theta(s) + T_w \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan membuat $T_w = 0$, maka didapat Persamaan (2.5) :

$$k_1 e_c(s) - k_2 \cdot s \cdot \theta(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + B \cdot s \cdot \theta(s) + T_w \dots \dots \dots (2.5)$$

Sehingga hubungan antara kecepatan dengan tegangan kontrol dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{e_c(s)} = \frac{k_1}{J.s^2 + k_2.s + B.s} = \frac{K_m}{s(\tau_m s + 1)} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

K_m = Konstanta *gain* motor

τ_m = *Time constant* motor

Tabel 2.1. Spesifikasi Motor AC Servo

Karakteristik	Nilai
Tegangan	230 V
Daya	100 W
Kecepatan	50 rpm
Momen Inersia (J)	0.052 kg <i>cm</i> ²
Koefisien Gesek (B)	0.01875
Jari-jari <i>Shaft</i>	0.0175 m

Motor AC *servo* yang digunakan pada *paper* "*Position Tracking Performance of Servomotor Based on New Modified Repetitive Control Strategy*" memiliki spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan identifikasi yang telah dilakukan pada *paper* tersebut didapat fungsi alih motor AC servo yang ditunjukkan pada Persamaan (2.7)

$$G(s) = \frac{0.4}{s(2.7763s + 1)} \dots \dots \dots (2.7)$$

2.3. Kontur

Untuk menghasilkan objek sesuai yang diinginkan, perlu dilakukan *tracking* kontur oleh tiap *axis* secara akurat. Kesalahan kontur yang terjadi dapat direduksi dengan menerapkan metode kontrol tertentu yang sesuai untuk meminimalisasi nilai model kesalahan kontur yang dibentuk. Secara umum, kontur untuk membentuk suatu objek terdiri atas kontur linier dan lingkaran. Kontur linier ditunjukkan pada Gambar

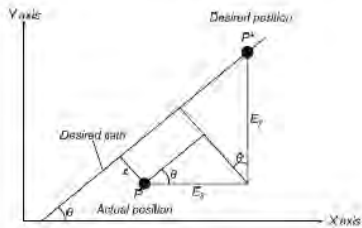
2.4. Dalam perhitungan kontur linier didapatkan model kesalahan kontur linier adalah sebagai berikut :

$$\varepsilon_c = -E_x \sin \theta + E_y \cos \theta \dots\dots\dots(2.8)$$

E_x adalah kesalahan posisi *axis* X, E_y adalah kesalahan posisi *axis* Y, dan θ adalah sudut antara lintasan yang diinginkan dengan *axis* X. Oleh karena itu *gain* variabel C_x dan C_y untuk kontur linier adalah

$$C_x = \sin \theta \dots\dots\dots(2.9)$$

$$C_y = \cos \theta \dots\dots\dots(2.10)$$



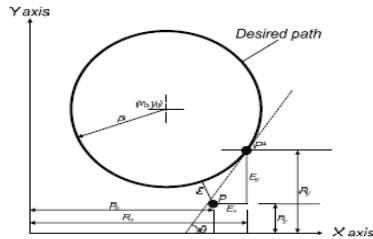
Gambar 2.4. Kontur Linier

Kontur sirkular dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5, didapatkan model *kesalahan* kontur sirkular adalah sebagai berikut pada Persamaan (2.11).

$$\varepsilon_c = \sqrt{(P_x - x_0)^2 + (P_y - y_0)^2} - \rho \dots\dots\dots(2.11)$$

ρ adalah jari-jari lingkaran, (x_0, y_0) adalah titik pusat lingkaran dan (P_x, P_y) adalah posisi aktual dari alat kerja. Dari ilustrasi *contour kesalahan* pada Gambar 2.3, posisi aktual dapat direpresentasikan sebagai berikut

$$\begin{aligned} P_x &= R_x - E_x \\ &= -\rho \cdot \cos \theta + y_0 - E_y \end{aligned}$$



Gambar 2.5. Kontur Sirkular

R_x dan R_y adalah posisi referensi, E_x dan E_y adalah kesalahan posisi *axis* X dan Y. Sehingga dapat diturunkan menjadi Persamaan (2.12) yaitu

$$\varepsilon_c = \sqrt{(\rho \cdot \sin \theta - E_x)^2 + (\rho \cdot \cos \theta - E_y)^2} - \rho \dots \dots \dots (2.12)$$

Kemudian persamaan kesalahan kontur didekati dengan menggunakan deret Taylor dapat dinyatakan pada Persamaan (2.13)

$$\varepsilon_c = - \left[\sin \theta - \frac{E_x}{2\rho} \right] E_x + \left[\cos \theta + \frac{E_y}{2\rho} \right] E_y \dots \dots \dots (2.13)$$

Sehingga didapatkan *gain* variabel C_x dan C_y untuk kontur sirkular adalah

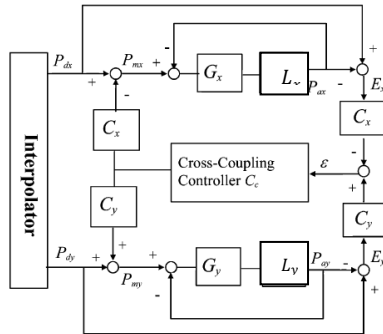
$$C_x = \sin \theta - \frac{E_x}{2\rho} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$C_y = \cos \theta + \frac{E_y}{2\rho} \dots \dots \dots (2.15)$$

2.4. Cross Coupled Control (CCC) [1], [2]

CCC adalah struktur kontrol CNC *multiaxis* yang diajukan oleh Yoram Koren pada tahun 1980 untuk meningkatkan akurasi pembentukan kontur. Dalam konsep struktur CCC, mesin CNC *multiaxis* dipandang sebagai satu kesatuan *unit* kontrol. Kesalahan kontur yang terjadi dapat direduksi dengan menerapkan metode kontrol

tertentu yang sesuai untuk meminimalisasi nilai fungsi alih kesalahan kontur yang dibentuk. Blok Diagram CCC untuk CNC 2 Axis ditunjukkan pada Gambar 2.6. L_x merepresentasikan fungsi alih *plant*, G_x dan G_y adalah kontroler PID untuk tiap *axis* dan C_c adalah algoritma kontrol untuk mereduksi kesalahan kontur.



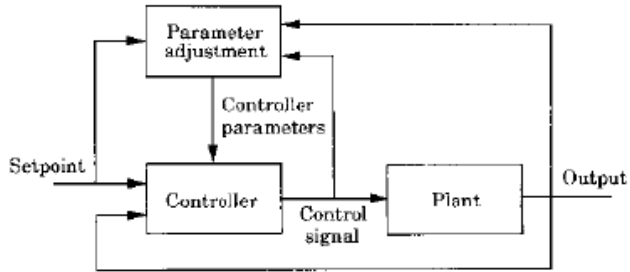
Gambar 2.6. Struktur CCC

2.5. Sistem Pengaturan Adaptif [3]

Sistem pengaturan umpan balik konvensional merupakan sistem pengaturan dengan sifat parameter tetap. Sistem pengaturan konvensional hanya dapat digunakan untuk mengatur proses dengan nilai parameter *plant* tetap. Namun, pada kenyataannya, parameter dari proses selalu bernilai tidak tetap karena dipengaruhi oleh dinamisasi yang berasal dari luar sistem. Hal ini menjadi kelemahan sistem pengaturan umpan balik konvensional karena nilai parameter kontroler yang tetap hanya mampu melakukan pengaturan secara optimal pada nilai parameter *plant* yang tetap. Oleh karena itu, terdapat penyempurnaan untuk mengatasi perubahan parameter *plant* tersebut yakni dengan menggunakan sistem pengaturan adaptif.

Kontroler adaptif adalah kontroler yang memiliki sifat untuk melakukan adaptasi. Kontroler adaptif memiliki karakteristik mampu merubah nilai parameter kontrolernya secara adaptif mengikuti perubahan parameter *plant* sedemikian rupa sehingga sistem yang dikendalikannya mampu memenuhi spesifikasi desain yang ditentukan.

Kontrol adaptif terdiri atas 2 *feedback loop* yang ditunjukkan diagram blok pada Gambar 2.7. *Loop* pertama adalah *feedback* yang terdiri dari proses dan kontroler. *Loop* kedua adalah *feedback* yang berfungsi melakukan perubahan parameter kontroler.



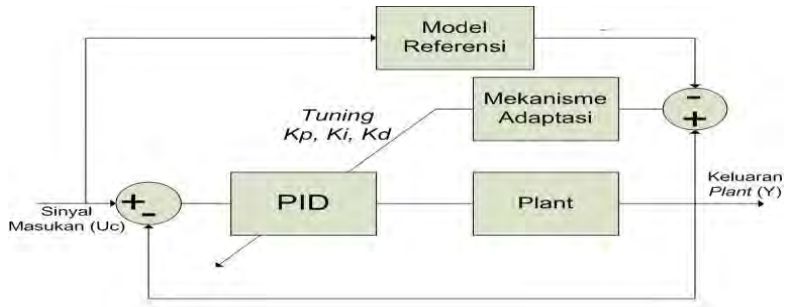
Gambar 2.7. Diagram blok kontrol adaptif

2.6. Model Reference Adaptive Control (MRAC) [4], [5]

MRAC adalah salah satu metode kontrol adaptif yang memiliki karakteristik performansi sistem yang ingin dicapai diekspresikan dalam bentuk model referensi. Model referensi adalah model yang ingin dicapai setelah sistem diberi kontroler. MRAC memiliki kemampuan mekanisme penyesuaian parameter kontroler berdasarkan sinyal-sinyal di dalam sistem. Keluaran dari plant dan model (y dan y_m) dibandingkan, sehingga didapatkan nilai kesalahan *plant* terhadap model acuannya (e). Blok Diagram MRAC ditunjukkan pada Gambar 2.8. Feedback loop MRAC terbagi menjadi 2, yaitu *loop* pertama berisikan proses dan kontroler, ada pula *loop* kedua yang berfungsi mengubah parameter kontroler secara adaptif.

MRAC mengatur parameter θ pada kontroler $C(\theta)$ secara adaptif agar respon *plant* mampu mengikuti respon model referensi secara sempurna. Salah satu pendekatan dengan metode MRAC yang sering dipergunakan adalah aturan MIT. Nama aturan MIT berasal dari sejarah penemuan aturan ini yang asal mulanya dilakukan penelitian mengenai metode MRAC pada laboratorium instrumentasi di MIT. Dasar dari pendekatan MRAC dengan aturan MIT adalah meminimumkan nilai *loss function* pada Persamaan (2.16).

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \dots \dots \dots (2.16)$$



Gambar 2. 8. Diagram Blok MRAC

Untuk membuat nilai J mengecil, maka diperlukanlah untuk melakukan perubahan parameter θ ke arah negatif dari *gradien* J .

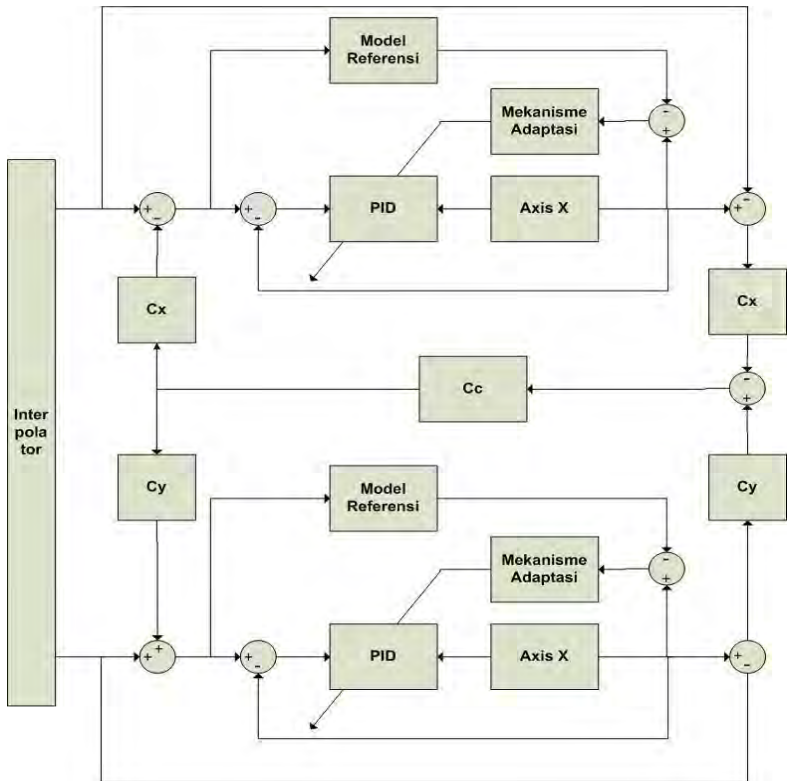
$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \cdot \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma \cdot e \cdot \frac{\partial e}{\partial \theta} \dots \dots \dots (2.17)$$

γ adalah *adaptation gain*, dari Persamaan (2.17) terlihat bahwa γ mempengaruhi perubahan parameter θ . Dengan makin besarnya γ , maka parameter θ bernilai makin negatif, sehingga menyebabkan nilai *loss function* $J(\theta)$ makin kecil dan kecepatan *plant* untuk beradaptasi dan mengikuti respon model referensi akan makin cepat.

2.7. Cross Coupled Adaptive Control

Cross Coupled Adaptive Control merupakan metode kontrol kombinasi yang tersusun atas kontroler PID MRAC dan CCC. Konsep utama dari metode ini adalah melakukan *tracking* kontur pada tiap *axis* dengan menggunakan kontroler PID MRAC, kemudian melakukan sinkronisasi kontrol antar *axis* dengan menggunakan metode CCC. Secara prinsip, kombinasi dari MRAC dan CCC ini dapat mengurangi *contour kesalahan* dan *kesalahan* posisi tiap *axis* [2]. Dengan demikian sinyal kontrol yang dihasilkan dapat membentuk kontur yang

diinginkan. Diagram blok dari *Cross Coupled Adaptive Control* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Diagram Blok *Cross Coupled Adaptive Control*

BAB III

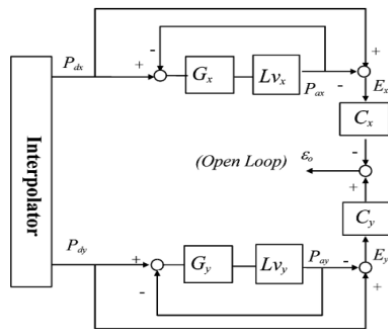
PERANCANGAN SIMULASI

CROSS COUPLED ADAPTIVE CONTROL

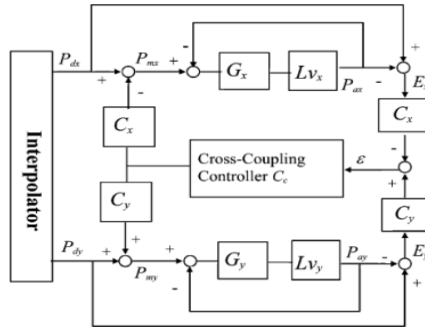
Metode *Cross Coupled Adaptive Control* adalah metode kontrol kombinasi dari *Cross Coupled Control* dan *Model Referenced Adaptive Control*. Metode *Cross Coupled Control* berperan dalam mereduksi kesalahan kontur dengan cara melakukan sinkronisasi kontrol antar *axis*. Sedangkan, metode *Model Referenced Adaptive Control* berperan dalam mereduksi kesalahan kontur yang diakibatkan oleh perubahan parameter *plant*. Dalam melakukan perancangan metode *Cross Coupled Adaptive Control*, diperlukan perancangan metode *Cross Coupled Control* dan *Model Referenced Adaptive Control*.

3.1. Perancangan *Cross Coupled Control*

Metode *Cross Coupled Control* memiliki kelebihan mampu melakukan sinkronisasi kontrol antar *axis* CNC dengan cara mereduksi nilai fungsi alih kesalahan kontur. Desain dari *Cross Coupled Control* difokuskan pada pemilihan algoritma kontrol C_c untuk meminimalkan nilai kesalahan kontur. Model *kesalahan* kontur diturunkan berdasarkan pada perbandingan kesalahan kontur pada sistem tanpa *couple* masing-masing *axis* (ε_0) yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 dengan kesalahan kontur pada sistem *couple* antar *axis* (ε) yang ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.1. Sistem CNC Dengan Sistem Tanpa *Couple*



Gambar 3.2. Sistem CNC Dengan Sistem *Couple*

Dari perhitungan untuk mencari hubungan ε_0 dan ε yang tercantum pada Lampiran, didapatkan fungsi alih kesalahan kontur yang ditunjukkan pada Persamaan (3.1).

$$\varepsilon(s) = \frac{1}{1+C_c(s)P(s)} \varepsilon_0(s) \dots \dots \dots (3.1)$$

P adalah notasi untuk mempersingkat perhitungan yang dinyatakan sebagai berikut :

$$P(s) = \frac{C_x^2(s)G_x(s)L_x(s)(1+G_y(s)L_y(s))+C_y^2(s)G_y(s)L_y(s)(1+G_x(s)L_x(s))}{(1+G_x(s)L_x(s))(1+G_y(s)L_y(s))}$$

$$= \frac{C_x^2(s)G_x(s)L_x(s)}{(1+G_x(s)L_x(s))} + \frac{C_y^2(s)G_y(s)L_y(s)}{(1+G_y(s)L_y(s))}$$

Dari Persamaan (3.1) tersebut, terlihat bahwa untuk meminimumkan ε , maka diperlukan nilai C_c yang besar. Kontur yang akan dibentuk berada pada frekuensi rendah. Oleh karena itu, algoritma kontrol C_c yang digunakan perlu memiliki karakteristik *gain* besar pada frekuensi rendah. Oleh karena itu, akan digunakan kontroler PI sebagai algoritma kontrol C_c untuk mereduksi kesalahan kontur.

3.2. Perancangan *Model Referenced Adaptive Control*

Metode *Model Referenced Adaptive Control* berperan dalam melakukan reduksi kesalahan kontur dengan cara melakukan *tuning* parameter kontroler tiap *axis* secara adaptif sedemikian rupa sehingga respon dari *plant* mampu mengikuti respon model referensi. Kontroler yang akan digunakan untuk tiap *axis* adalah kontroler PID. Akan dilakukan penyusunan metode *Model Referenced Adaptive Control* untuk melakukan *tuning* parameter kontroler PID pada tiap *axis* secara adaptif agar *plant* motor AC servo dengan fungsi alih pada Persamaan (2.7) mampu memiliki respon yang mampu mengikuti respon dari model referensi dan mampu mengkompensasi perubahan parameter *plant* yang disebabkan gangguan pada sistem.

Tahap perancangan kontroler PID *Model Referenced Adaptive Control* adalah sebagai berikut :

a. Fungsi Alih *Plant* :

Fungsi alih *plant* motor AC servo berdasarkan Persamaan (2.7) sebagai berikut :

$$G(s) = \frac{0,4}{s(2,7763s+1)}$$

Dengan menotasikan $\frac{d}{dt} = p$, maka fungsi alih *plant* motor AC servo tersebut dapat dinyatakan sesuai Persamaan (3.2)

$$G(p) = \frac{b}{ap^2+p} \dots\dots\dots(3.2)$$

b. Penentuan Kontroler

Kontroler yang akan digunakan pada tiap *axis* adalah kontroler PID yang memiliki kemampuan *tuning* parameter K_p , K_i dan K_d secara adaptif. Oleh karena itu akan digunakan fungsi alih kontroler PID yang ditunjukkan pada Persamaan (3.3).

$$u(t) = K_p(u_c(t) - y(t)) + K_i \int_0^t (u_c(t) - y(t))dt + K_d \frac{d(u_c(t) - y(t))}{dt} \dots\dots\dots(3.3)$$

c. Penentuan Persamaan Keluaran *Plant*

Keluaran *plant* dapat dirumuskan sesuai pada Persamaan (3.4).

$$y(t) = G(p).u(t).....(3.4)$$

Dengan menggunakan Persamaan (3.2) dan (3.3), maka dapat dilakukan perhitungan sebagai berikut.

$$y(t) = \frac{b}{ap^2+p} \left[K_p(u_c(t) - y(t)) + \frac{K_i}{p} \cdot (u_c(t) - y(t)) + K_d \cdot p \cdot (u_c(t) - y(t)) \right]$$

$$y(t) = \frac{[bK_p p + bK_i + bK_d p^2]}{[ap^3 + p^2 + bK_p p + bK_i + bK_d p^2]} \cdot u_c(t)$$

$$y(t) = \frac{p^2(bK_d/a) + p(bK_p/a) + bK_i}{p^3(a) + p^2(1 + bK_d/a) + p(bK_p/a) + bK_i} \cdot u_c(t)$$

$$y(t) = \frac{p^2(bK_d/a) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)}{p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)} \cdot u_c(t).....(3.5)$$

d. Penentuan Fungsi Alih Model Referensi

Model referensi adalah suatu model yang ditentukan oleh desainer kontrol. Respon dari model referensi ini merepresentasikan respon model yang ingin dicapai. Dalam melakukan kontrol adaptif dengan menggunakan metode *Model Referenced Adaptive Control*, dilakukan pengkondisian *perfect model following* dimana diinginkan respon *plant* mampu sama dengan respon model referensi. Oleh karena itu, akan dilakukan pemilihan model referensi berdasarkan Persamaan (3.6).

$$y(t) = y_m(t).....(3.6)$$

Berdasarkan Persamaan (3.5), dilakukan pemilihan model referensi memiliki bentuk sesuai pada Persamaan (3.7).

$$G_m(t) = \frac{b_m p^2 + b_{m1} p + b_{m2}}{p^3 + a_{m1} p^2 + a_{m2} p + b_{m2}} \dots\dots\dots(3.7)$$

Spesifikasi model referensi yang diinginkan adalah memiliki *time constant* 0.5 dan *error steady state* = 0. Oleh karena itu akan digunakan fungsi alih yang memiliki *pole* dominan bernilai 2. Model referensi yang digunakan dinyatakan pada Persamaan (3.8).

$$G_m(t) = \frac{s^2 + 11s + 10}{s^3 + 8s^2 + 17s + 10} \dots\dots\dots(3.8)$$

e. Penentuan Persamaan *Tuning* Parameter Kontroler

Tuning parameter kontroler secara adaptif digunakan untuk mengkompensasi kesalahan kontur yang disebabkan oleh perubahan parameter *plant*. Persamaan *tuning* parameter Kp, Ki dan Kd secara adaptif ditunjukkan pada Persamaan (3.9). Penurunan Persamaan (3.9) tercantum pada Lampiran.

$$K_p = \left(-\frac{\gamma_p}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{p}{p^3 + a_{m1} p^2 + a_{m2} p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots\dots\dots(3.9a)$$

$$K_i = \left(-\frac{\gamma_i}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{1}{p^3 + a_{m1} p^2 + a_{m2} p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots\dots\dots(3.9b)$$

$$K_d = \left(-\frac{\gamma_d}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{p^2}{p^3 + a_{m1} p^2 + a_{m2} p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots\dots\dots(3.9c)$$

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

CROSS COUPLED ADAPTIVE CONTROL

4.1 Gambaran Umum Simulasi Sistem

Pengujian sistem dilakukan dengan cara melakukan simulasi penerapan metode *Cross Coupled Adaptive Control* pada *transfer function plant* untuk mengetahui performansi metode kontrol. Pada pengaturan pembentukan kontur dengan mesin CNC, diperlukan kemampuan *tracking* yang akurat pada tiap *axis*nya. Oleh karena itu, secara umum akan dilakukan pengujian kemampuan *Cross Coupled Adaptive Control* untuk melakukan kontrol posisi *axis* dalam melakukan pembentukan kontur lingkaran dan linier.

Semakin akurat pengaturan posisi *axis* X dan *axis* Y dalam melakukan *tracking* sinyal referensi, maka akan semakin akurat kontur yang dihasilkan. Kontrol posisi *axis* dalam melakukan pembentukan kontur linier dilakukan dengan menggunakan sinyal *ramp* sebagai masukan untuk *axis* X dan *axis* Y. Sedangkan, kontrol posisi *axis* dalam melakukan pembentukan kontur lingkaran dibentuk dengan menggunakan masukan sinyal sinus pada *axis* X dan sinyal cosinus pada *axis* Y. Simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab dengan waktu simulasi 150 detik.

Pengujian yang dilakukan terdiri dari 3 macam. Pengujian yang pertama adalah pengujian performansi metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan melakukan variasi pada *gain* adaptasi nilai parameter kontroler. Pengujian yang kedua adalah pengujian untuk mengamati performansi kontroler dalam melakukan *tracking* kontur pada sistem dengan melakukan variasi nilai gangguan yang ditambahkan pada sistem. Pengujian ketiga adalah pengujian untuk membandingkan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan metode *Cross Coupled Control* dan *Model Referenced Adaptive Control*. Pengujian yang ketiga ini akan menjadi indikator penilaian metode *Cross Coupled Adaptive Control* sebagai pengembangan dari metode *Cross Coupled Control* dan *Model Referenced Adaptive Control* yang dahulunya pernah dilakukan penelitian dalam melakukan *tracking* kontur pada mesin CNC.

4.2. Pemilihan Parameter Kontroler

Parameter *Cross Coupled Adaptive Control* berupa *gain* adaptasi (γ) berpengaruh pada kecepatan *tuning* parameter kontroler Kp, Ki dan Kd. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisa mengenai penggunaan kontroler P, PI, PD atau PID pada *plant* dengan menggunakan teorema harga akhir. Dengan menggunakan kontroler PD, didapat *error steady state* bernilai nol berdasarkan perhitungan pada Persamaan (4.1).

$$\frac{E(s)}{X(s)} = \frac{s^2 + as}{s^2 + (K_p \tau_d b + a)s + K_p b} \dots\dots\dots(4.1a)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) \dots\dots\dots(4.1b)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s^2 + as}{s^2 + (K_p \tau_d b + a)s + K_p b} \cdot \frac{1}{s} = 0 \dots\dots\dots(4.1c)$$

Oleh karena itu, pada *Cross Coupled Adaptive Control* ini parameter kontroler yang akan mengalami *tuning* secara adaptif adalah parameter Kp dan Kd. *Gain* adaptasi untuk Kp dinyatakan dengan (γ_p) dan *gain* adaptasi untuk Kd dinyatakan dengan (γ_d)

4.3. Simulasi Sistem

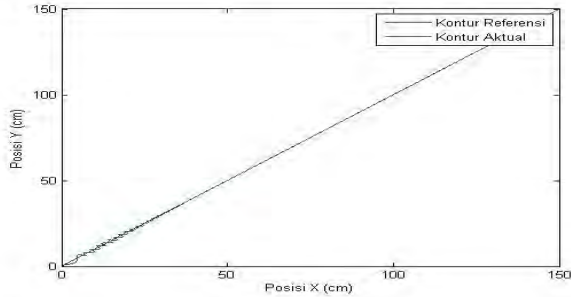
Simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan fungsi alih motor AC *servo*. Simulasi dilakukan pada sistem untuk diperoleh analisa mengenai performansi kontroler terhadap berbagai variasi parameter kontroler dan kemampuan dalam mengkompensasi kesalahan pada sistem yang dipengaruhi oleh gangguan pada sistem. Simulasi dilakukan dalam melakukan kontrol untuk membentuk kontur linier dan lingkaran.

4.3.1. Pengujian dengan Variasi Parameter *Gain* Adaptasi (γ)

Pengujian dengan variasi parameter (γ) digunakan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan tiap parameter kontroler. Dengan memahami pengaruh dari tiap parameter kontroler, maka akan mampu dilakukan perancangan metode *Cross Coupled Adaptive Control* secara optimal. Dilakukan pengujian dengan variasi perubahan nilai γ_p dan γ_d

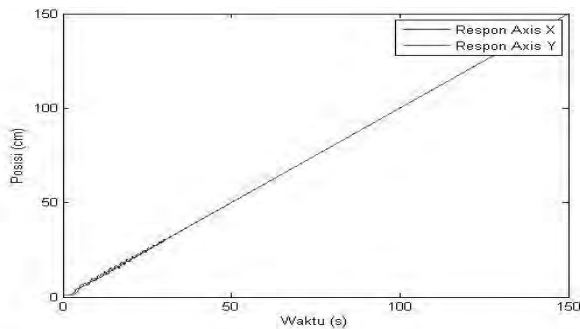
untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai *gain* adaptasi terhadap respon *plant*.

Pengujian pertama dilakukan dengan menggunakan nilai γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5. Hasil respon *plant* dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dalam melakukan kontrol posisi untuk *tracking* kontur linier diitunjukkan pada Gambar 4.1.



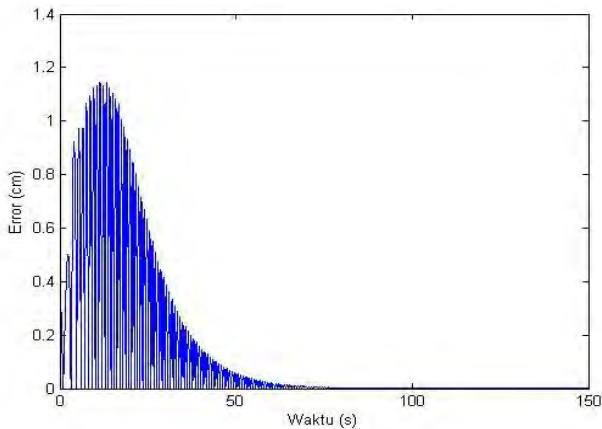
Gambar 4. 1. *Tracking* Kontur Linier dengan Menggunakan γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5

Terlihat bahwa dengan menggunakan γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5 maka respon dalam melakukan *tracking* kontur sudah mampu mencapai kontur referensi. Kemampuan dalam melakukan *tracking* kontur dipengaruhi oleh hasil respon *tracking* posisi sinyal referensi *axis* X dan *axis* Y. Hasil *tracking* sinyal referensi *axis* X dan *axis* Y ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2. *Tracking* Sinyal Referensi Linier pada Axis X dan Axis Y dengan Menggunakan γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5

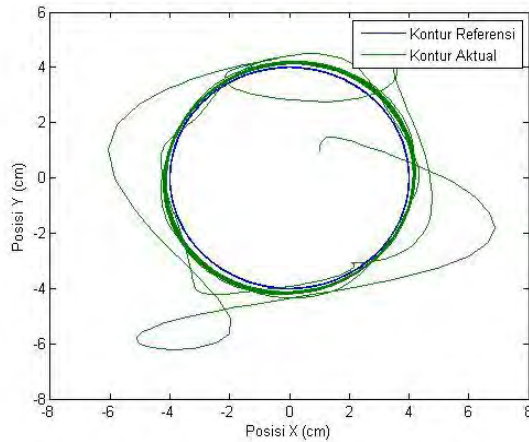
Terlihat bahwa *axis X* dan *axis Y* telah mampu mengikuti *tracking* sinyal referensi linier dengan sempurna. Namun, pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 terlihat bahwa pada awal melakukan *tracking* kontur dan *tracking* sinyal referensi terjadi kesalahan dalam melakukan *tracking*. Kesalahan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Menggunakan Nilai γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5

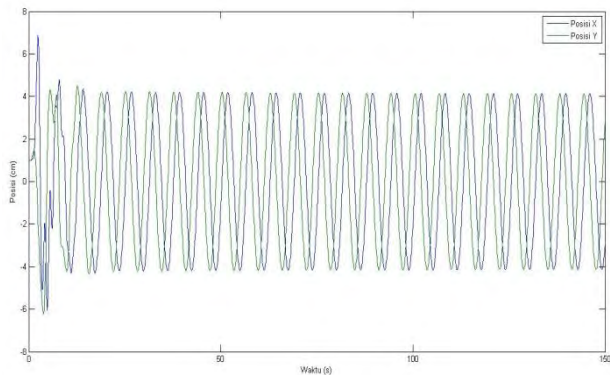
Terlihat bahwa kesalahan mencapai 1.1 cm pada saat awal melakukan *tracking*. Hal ini disebabkan adanya karakteristik adaptif yang dimiliki metode *Cross Coupled Adaptive Control*. Hal ini menyebabkan adanya fenomena *tuning* parameter kontroler tiap *axis* sampai pada akhirnya didapatkan nilai parameter kontroler tertentu yang mampu membuat respon posisi *plant* mampu mengikuti posisi referensi.

Hasil respon *plant* dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dalam melakukan kontrol posisi untuk *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.4. Terlihat bahwa *tracking* kontur mampu mengikuti kontur lingkaran referensi dengan setelah beberapa saat dan terjadi kesalahan *tracking* pada saat awal melakukan *tracking* kontur.



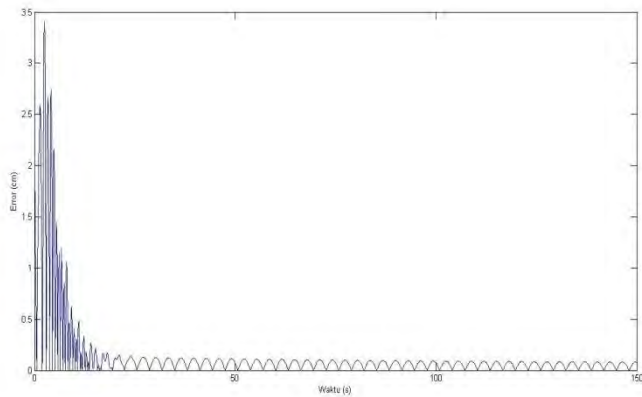
Gambar 4. 4. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Menggunakan γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5

Tracking kontur referensi dipengaruhi oleh *tracking* posisi referensi yang dilakukan oleh tiap *axis*. Semakin akurat *tracking* posisi referensi yang dilakukan oleh tiap *axis*, maka akan semakin akurat *tracking* kontur yang dilakukan. Hasil *tracking* posisi tiap *axis* ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5. *Tracking* Sinyal Referensi Lingkaran pada *Axis* X dan *Axis* Y dengan Menggunakan γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5

Terlihat bahwa *axis X* dan *axis Y* telah mampu mengikuti *tracking* sinyal referensi sinus dan cosinus dengan sempurna. Namun, pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 terlihat bahwa pada awal melakukan *tracking* kontur dan *tracking* sinyal referensi terjadi kesalahan dalam melakukan *tracking*. Kesalahan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.6.



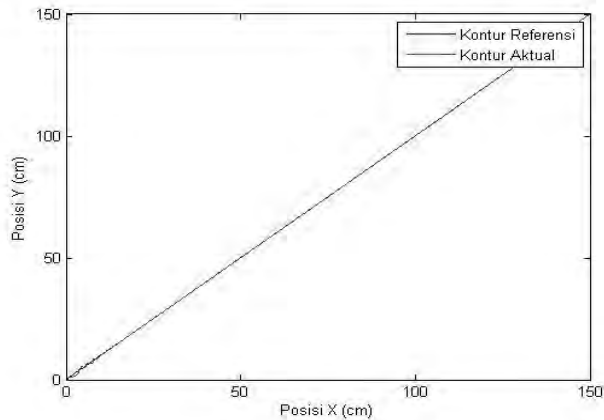
Gambar 4. 6. Kesalahan *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Nilai γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0,5

Terlihat bahwa kesalahan mencapai 3.7 cm pada saat awal melakukan *tracking*. Hal ini disebabkan adanya karakteristik adaptif yang dimiliki metode *Cross Coupled Adaptive Control*. Hal ini menyebabkan adanya fenomena *tuning* parameter kontroler tiap *axis* sampai pada akhirnya didapatkan nilai parameter kontroler tertentu yang mampu membuat respon posisi *plant* mampu mengikuti posisi referensi dengan kesalahan minimal.

Dari Gambar 4.1 dan Gambar 4.4. yang menunjukkan respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur dan Gambar 4.2 dan Gambar 4.5 yang menunjukkan respon *axis X* dan *axis Y* dalam melakukan *tracking* posisi referensi, maka terlihat bahwa kesalahan saat awal pembentukan kontur terjadi karena keterlambatan respon *plant* dalam mengikuti model referensi, dan adanya *overshoot* pada *tracking*. Keterlambatan

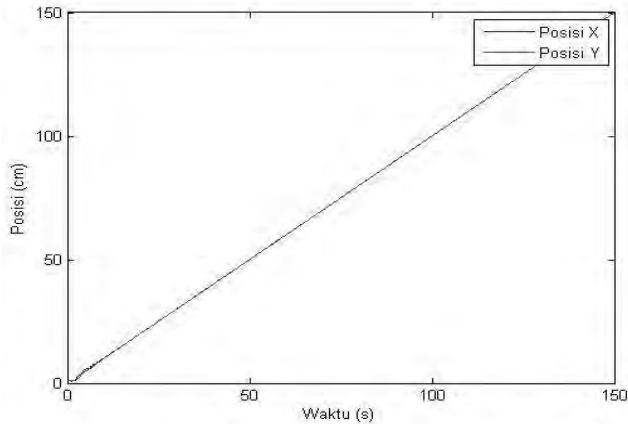
respon *plant* dapat dikompensasi dengan memperbesar penggunaan parameter kontroler K_p untuk mempercepat respon. Sedangkan, *overshoot* pada respon *plant* mampu dikompensasi dengan memperbesar penggunaan parameter kontroler K_d .

Oleh karena itu, akan dilakukan pengujian dengan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13. Hasil respon *plant* dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dalam melakukan kontrol posisi untuk *tracking* kontur linier ditunjukkan pada Gambar 4.7.



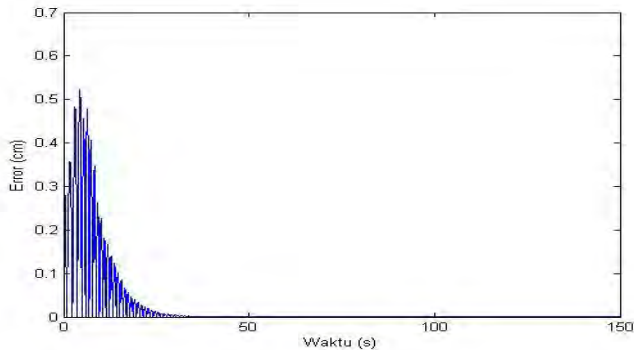
Gambar 4. 7. *Tracking* Kontur Linier dengan Menggunakan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13

Terlihat bahwa dengan menggunakan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13 maka respon dalam melakukan *tracking* kontur sudah mampu mencapai kontur referensi. Tampak bahwa, respon *tracking* kontur mampu lebih baik dibandingkan pengujian dengan γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0.5. Kemampuan dalam melakukan *tracking* kontur dipengaruhi oleh hasil respon *tracking* posisi sinyal referensi *axis X* dan *axis Y*. Hasil *tracking* sinyal referensi *axis X* dan *axis Y* ditunjukkan pada Gambar 4.8



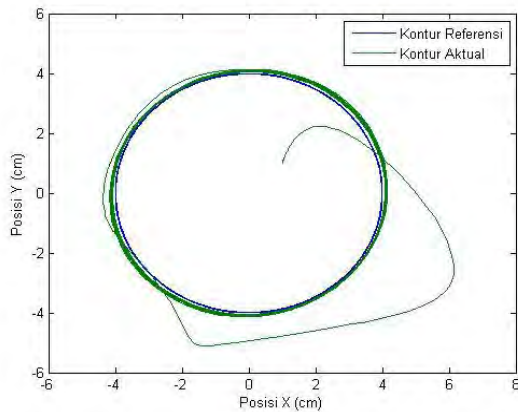
Gambar 4. 8. *Tracking Sinyal Referensi Linier pada Axis X dan Axis Y dengan Menggunakan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13*

Terlihat bahwa *axis X* dan *axis Y* telah mampu mengikuti *tracking* sinyal referensi linier dengan sempurna. Namun, pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 terlihat bahwa pada awal melakukan *tracking* kontur dan *tracking* sinyal referensi terjadi kesalahan dalam melakukan *tracking*. Kesalahan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.9.



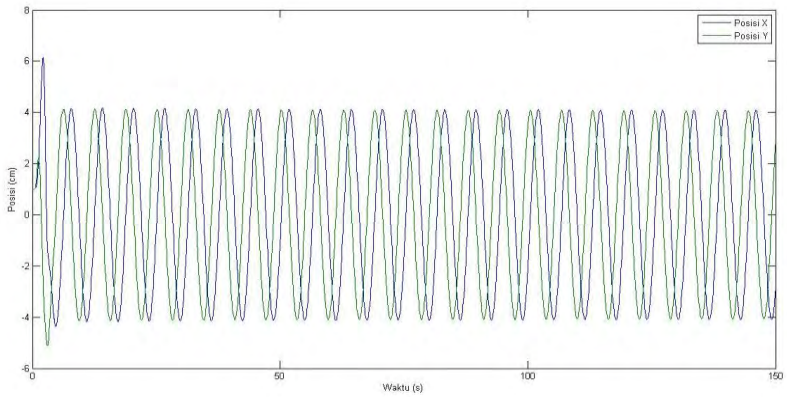
Gambar 4. 9. *Kesalahan Tracking Kontur Linier dengan Nilai γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13*

Terlihat bahwa kesalahan mencapai 0.5 cm pada saat awal melakukan *tracking*. Gambar 4.9 menunjukkan kesalahan yang lebih kecil daripada kesalahan yang terjadi saat nilai γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0.5. Hasil respon *plant* dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13 dalam melakukan kontrol posisi untuk *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.10. Terlihat bahwa *tracking* kontur mampu mengikuti kontur lingkaran referensi dengan setelah beberapa saat dan terjadi kesalahan *tracking* pada saat awal melakukan *tracking* kontur.



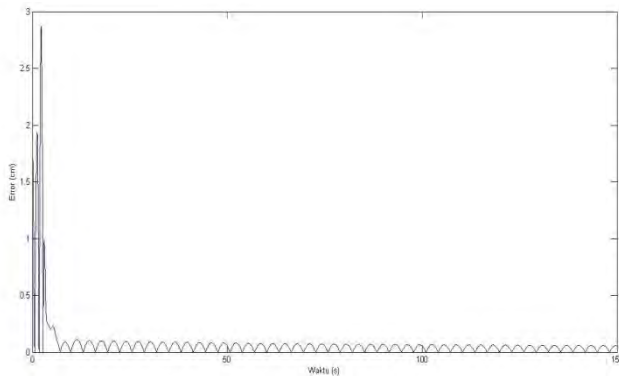
Gambar 4. 10. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Menggunakan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13

Tracking kontur referensi dipengaruhi oleh *tracking* posisi referensi yang dilakukan oleh tiap *axis*. Semakin akurat *tracking* posisi referensi yang dilakukan oleh tiap *axis*, maka akan semakin akurat *tracking* kontur yang dilakukan. Hasil *tracking* posisi tiap *axis* ditunjukkan pada Gambar 4.11. Terlihat bahwa *axis* X dan *axis* Y telah mampu mengikuti *tracking* sinyal referensi sinus dan cosinus dengan sempurna.



Gambar 4. 11. *Tracking* Sinyal Referensi Lingkaran pada *Axis X* dan *Axis Y* dengan Menggunakan γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13

Terlihat bahwa *axis X* dan *axis Y* telah mampu mengikuti *tracking* sinyal referensi sinus dan cosinus dengan sempurna. Namun, pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 terlihat bahwa pada awal melakukan *tracking* kontur dan *tracking* sinyal referensi terjadi kesalahan dalam melakukan *tracking*. Kesalahan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12. Kesalahan *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Nilai γ_p sebesar 400 dan γ_d sebesar 13

Terlihat bahwa kesalahan mencapai 2.75 cm pada saat awal melakukan *tracking*. Kesalahan yang terjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan penggunaan nilai γ_p sebesar 100 dan γ_d sebesar 0.5. Dalam melakukan perbandingan performansi metode kontrol saat dilakukan pengujian dengan variasi parameter kontroler, digunakanlah metode perhitungan RMSE sebagai rata-rata nilai dari kesalahan yang terjadi. Adapun Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan nilai RMSE dengan variasi nilai γ_p dan γ_d .

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai RMSE Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Variasi Nilai γ_p dan γ_d

Kontur	γ_p	γ_d	RMSE
Lingkaran	-100	-0.5	0.2239
	-200	-0.5	0.2380
	-300	-0.5	0.1946
	-400	-0.5	0.2256
	-400	-1.0	0.1686
	-400	-5.0	0.0866
	-400	-10.0	0.0695
	-400	-13.0	0.0671
Linier	-100	-0.5	0.4378
	-200	-0.5	0.4257
	-300	-0.5	0.4346
	-400	-0.5	0.4667
	-400	-1.0	0.4301
	-400	-5.0	0.3400
	-400	-10.0	0.3072
	-400	-13.0	0.3050

Terlihat bahwa dengan peningkatan nilai γ_p dan γ_d , maka nilai RMSE semakin kecil untuk masing-masing kontur yang akan dibentuk. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai γ , maka akan semakin cepat proses *tuning* paramater kontroler secara adaptif untuk mencapai nilai parameter kontroler yang mampu membuat respon *plant* mampu mengikuti respon referensi. Berdasarkan penurunan nilai RMSE, dapat

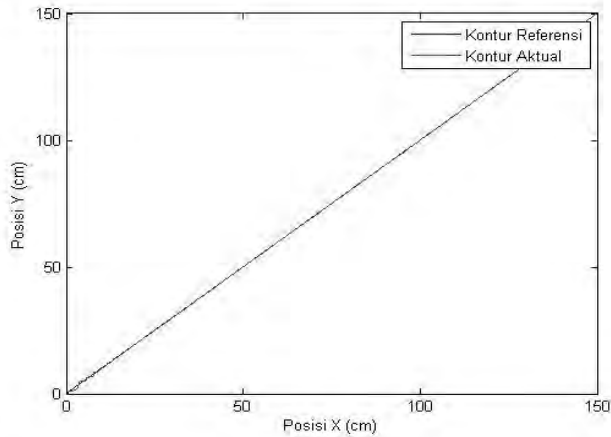
disimpulkan bahwa peningkatan nilai γ_p dan γ_d yang memacu adaptasi parameter K_p dan K_d pada kontroler mampu mengurangi permasalahan adanya *overshoot* pada saat melakukan *tracking* dan waktu transien dalam melakukan adaptasi parameter kontroler.

4.3.2. Pengujian dengan Variasi Gangguan pada Sistem

Dalam sistem nyata, respon dari *plant* dipengaruhi oleh berbagai gangguan dari luar. Gangguan yang mempengaruhi respon dari *plant* mengakibatkan adanya perubahan-perubahan pada parameter *plant* yang mampu menyebabkan terjadinya kesalahan dalam melakukan *tracking* kontur yang akan dibentuk. Pengujian dengan penambahan gangguan pada sistem dilakukan untuk menguji kelebihan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dalam mengkompensasi kesalahan pembentukan kontur dikarenakan perubahan parameter *plant*.

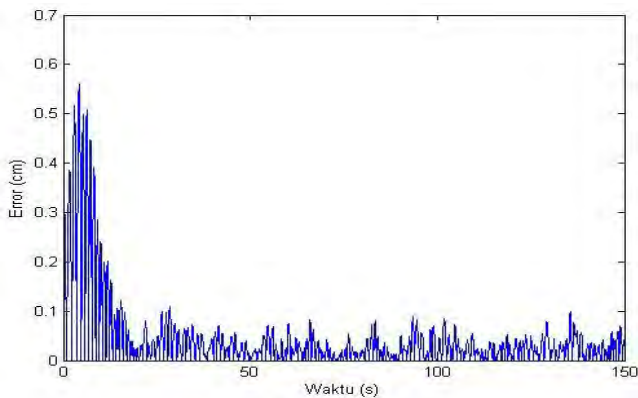
Pada pengujian ini, akan diberikan gangguan berupa *Gaussian Random Number* yang pada simulasinya direpresentasikan oleh *Random Number* pada Matlab. Pada pengujian ini, dilakukan variasi terhadap gangguan yang diberikan pada sistem. Gangguan pada sistem diberikan pada sinyal kontrol, keluaran *plant* dan sensor. Variasi dilakukan pada gangguan yang diberikan pada sinyal kontrol dan keluaran *plant* dengan nilai varian 0.01; 0.1; 1; 10; 100. Pengujian dengan pemberian variasi pada gangguan juga dilakukan untuk menguji kestabilan sistem jika diberikan gangguan yang diperbesar.

Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan gangguan dengan varian sebesar 0.01. Pengaturan posisi untuk *tracking* kontur linier menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* ditunjukkan pada Gambar 4.13. Terlihat bahwa respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur linier dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dapat mengikuti kontur referensi. Namun terlihat bahwa *tracking* kontur tidak mampu sebaik keadaan tanpa penambahan gangguan.



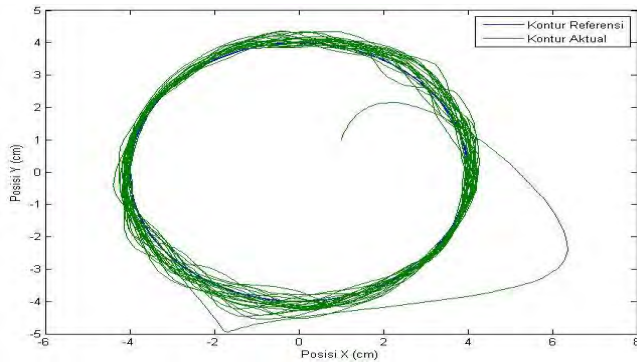
Gambar 4. 13. *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan Varian 0.01

Kesalahan *tracking* kontur linier dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 0.01 ditunjukkan pada Gambar 4.14. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



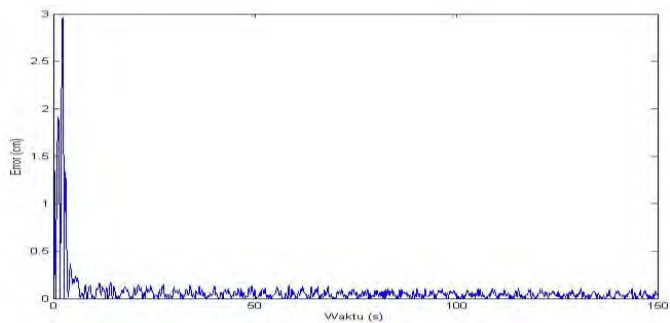
Gambar 4. 14. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 0.01

Respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan melakukan penambahan gangguan dengan varian 0.01 ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 15. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Penambahan Gangguan Varian 0.01

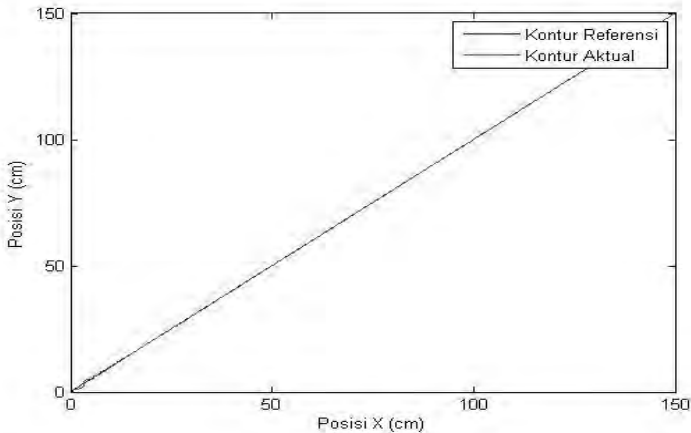
Kesalahan *tracking* kontur lingkaran dengan penambahan gangguan dengan varian 0.01 ditunjukkan pada Gambar 4.16. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



Gambar 4.16. Kesalahan *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 0.01

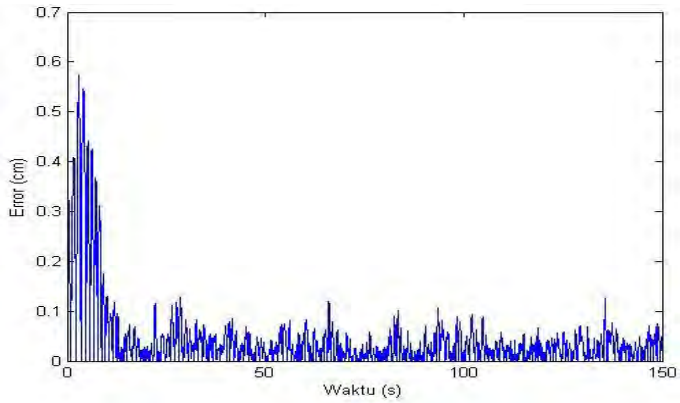
Dari respon *plant* yang dihasilkan dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 0.01, terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu mengkompensasi kesalahan *tracking* kontrol dikarenakan adanya perubahan parameter *plant*.

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan gangguan dengan varian sebesar 0.1. Pengaturan posisi untuk *tracking* kontrol linier menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* ditunjukkan pada Gambar 4.17. Terlihat bahwa respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontrol linier dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dapat mengikuti kontrol referensi.



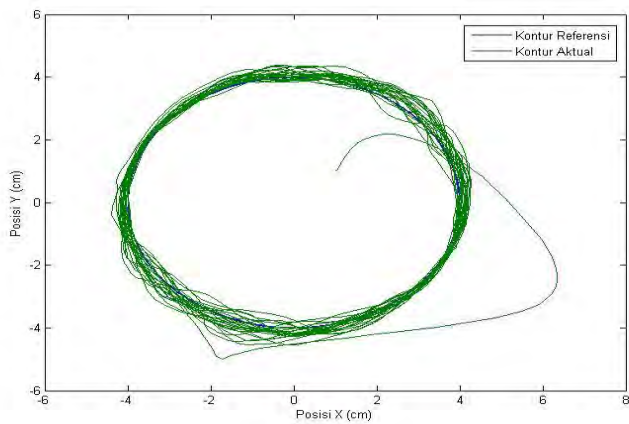
Gambar 4. 17. *Tracking* Kontrol Linier dengan Penambahan Gangguan Varian 0.1

Kesalahan *tracking* kontrol linier dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 0.01 ditunjukkan pada Gambar 4.14. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



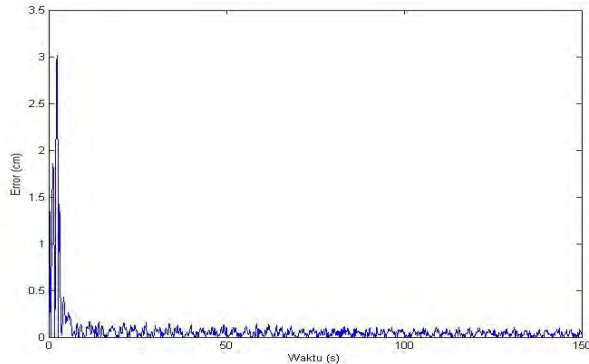
Gambar 4. 18. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 0.1

Respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan melakukan penambahan gangguan dengan varian 0.1 ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 19. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Penambahan Gangguan Varian 0.1

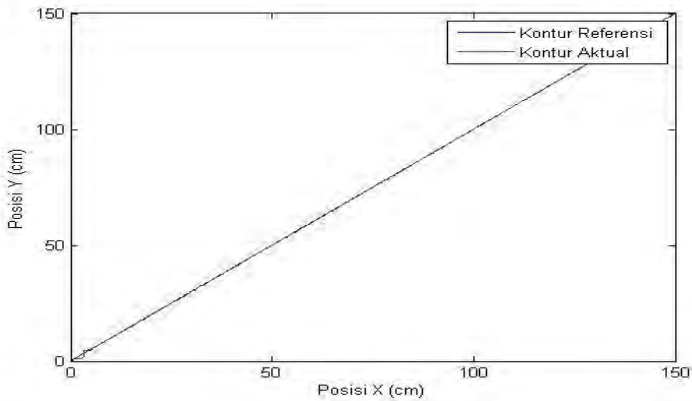
Kesalahan *tracking* kontur lingkaran dengan penambahan gangguan dengan varian 0.1 ditunjukkan pada Gambar 4.20. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



Gambar 4. 20. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 0.1

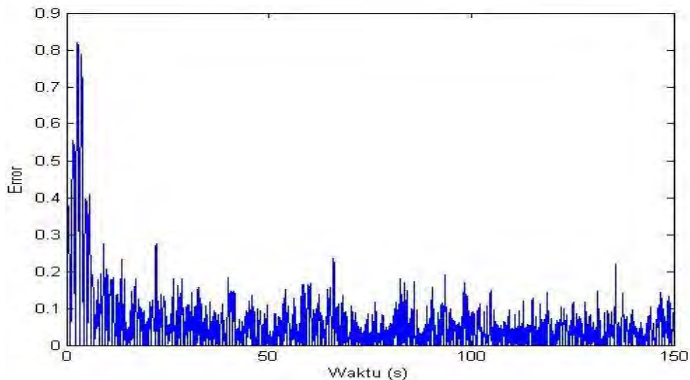
Dari respon *plant* yang dihasilkan dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 0.1, terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu mengkompensasi kesalahan *tracking* kontur dikarenakan adanya perubahan parameter *plant*.

Pengujian ketiga dilakukan dengan memberikan gangguan dengan varian sebesar 1. Pengaturan posisi untuk *tracking* kontur linier menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* ditunjukkan pada Gambar 4.21. Terlihat bahwa respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur linier dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dapat mengikuti kontur referensi.



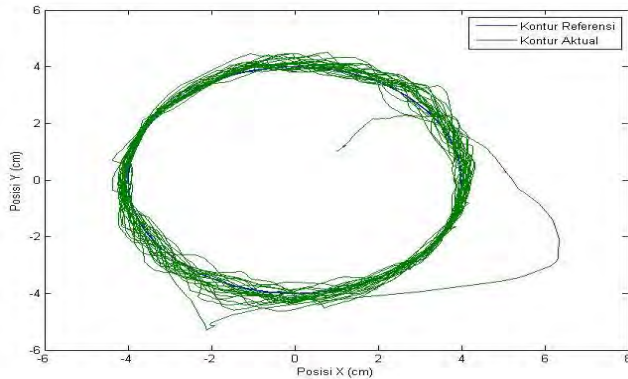
Gambar 4. 21. *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan Varian 1

Kesalahan *tracking* kontur linier dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 1 ditunjukkan pada Gambar 4.22. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



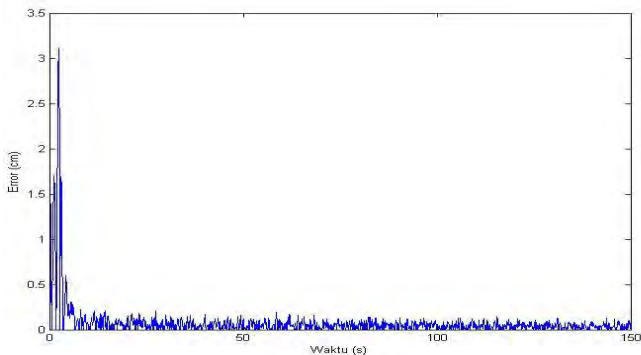
Gambar 4. 22. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 1

Respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan melakukan penambahan gangguan dengan varian 1 ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4. 23. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Penambahan Gangguan Varian 1

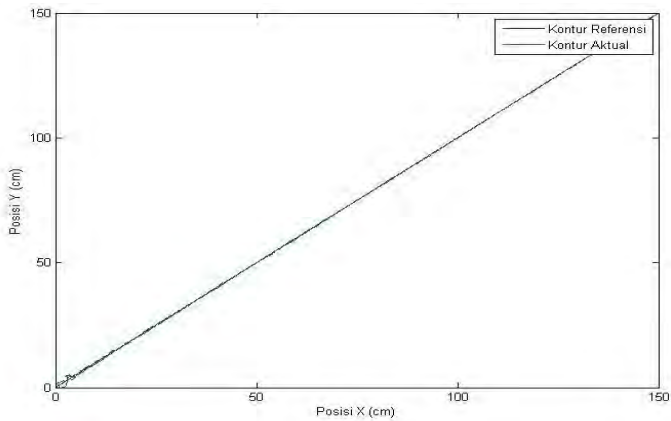
Kesalahan *tracking* kontur lingkaran dengan penambahan gangguan dengan varian 1 ditunjukkan pada Gambar 4.24. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



Gambar 4. 24. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 1

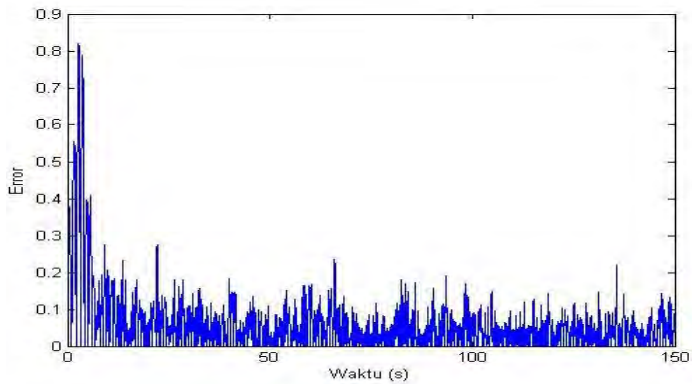
Dari respon *plant* yang dihasilkan dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 1, terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu mengkompensasi kesalahan *tracking* kontur dikarenakan adanya perubahan parameter *plant*.

Pengujian keempat dilakukan dengan memberikan gangguan dengan varian sebesar 10. Pengaturan posisi untuk *tracking* kontur linier menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* ditunjukkan pada Gambar 4.25. Terlihat bahwa respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur linier dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dapat mengikuti kontur referensi.



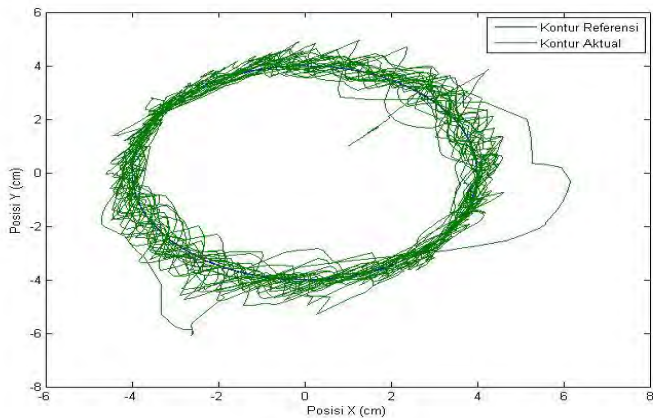
Gambar 4. 25. *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan Varian 10

Kesalahan *tracking* kontur linier dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 10 ditunjukkan pada Gambar 4.26. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



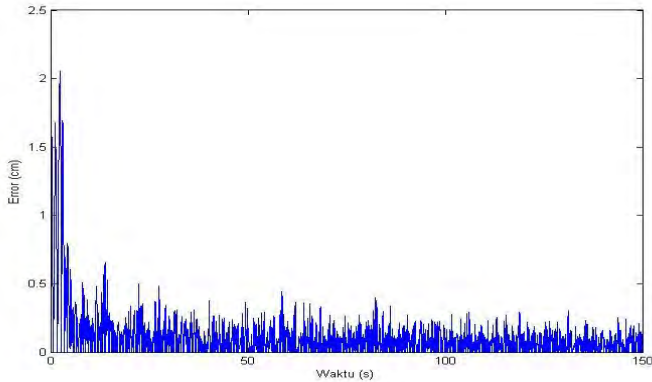
Gambar 4. 26. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 10

Respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan melakukan penambahan gangguan dengan varian 10 ditunjukkan pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Penambahan Gangguan Varian 10

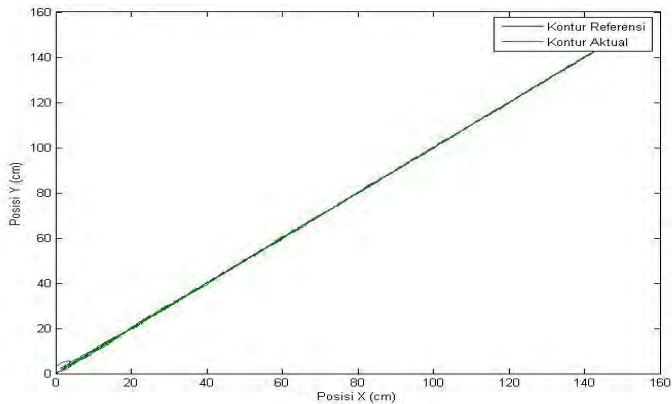
Kesalahan *tracking* kontur lingkaran dengan penambahan gangguan dengan varian 10 ditunjukkan pada Gambar 4.28. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



Gambar 4.28. Kesalahan *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Gangguan Varian 10

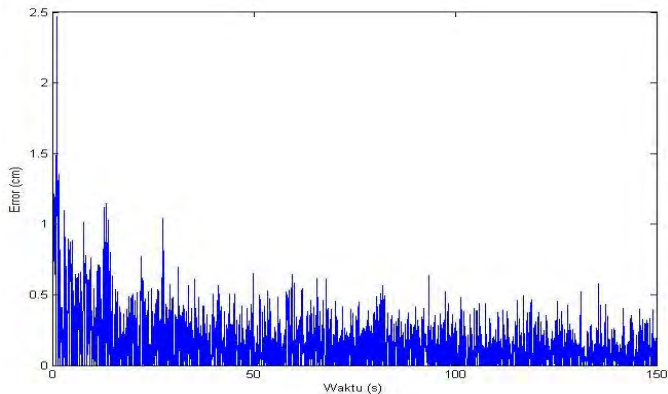
Dari respon *plant* yang dihasilkan dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 10, terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu mengkompensasi kesalahan *tracking* kontur dikarenakan adanya perubahan parameter *plant*.

Pengujian kelima dilakukan dengan memberikan gangguan dengan varian sebesar 100. *Tracking* kontur linier menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* ditunjukkan pada Gambar 4.29. Terlihat bahwa respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur linier dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* dapat mengikuti kontur referensi.



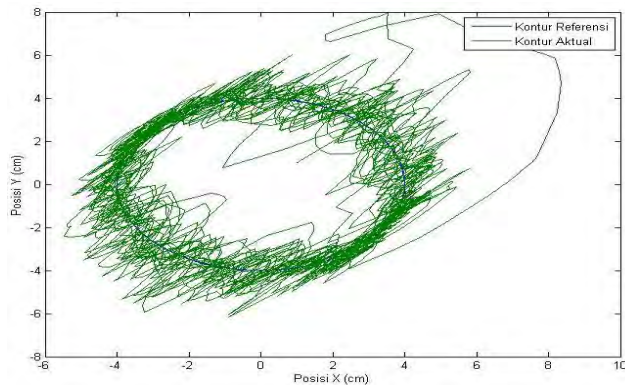
Gambar 4. 29. *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan Varian 100

Kesalahan *tracking* kontur linier dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 100 ditunjukkan pada Gambar 4.30. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



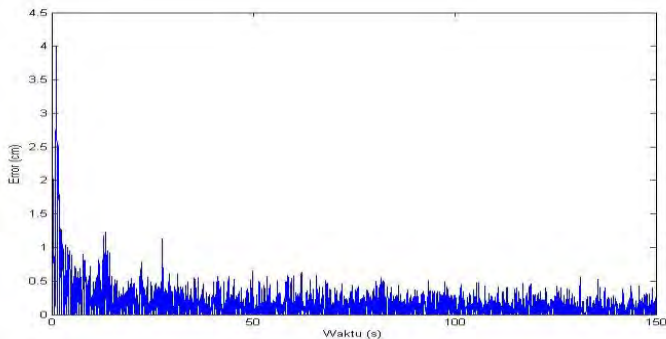
Gambar 4. 30. Kesalahan *Tracking* Kontur Linier dengan Penambahan Gangguan dengan Varian 100

Respon *plant* dalam melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan melakukan penambahan gangguan dengan varian 100 ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4. 31. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Penambahan Gangguan Varian 100

Kesalahan *tracking* kontur lingkaran dengan penambahan gangguan dengan varian 100 ditunjukkan pada Gambar 4.32. Terlihat bahwa kesalahan tidak bisa mencapai nilai nol karena adanya penambahan gangguan pada sistem.



Gambar 4.32. Kesalahan *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Gangguan Varian 10

Dari respon *plant* yang dihasilkan dengan penambahan gangguan dengan varian sebesar 100, terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu mengkompensasi kesalahan *tracking* kontur dikarenakan adanya perubahan parameter *plant* dengan variasi gangguan dengan varian bernilai 0.01, 0.1, 1, 10 dan 100. Tabel 4.2 menunjukkan perbandingan nilai RMSE pada saat dilakukan pengujian dengan penambahan gangguan pada sistem.

Tabel 4.2. Perbandingan Nilai RMSE Pengujian dengan Variasi Nilai Varian Gangguan

Kontur	Varian	RMSE
Linier	0.01	0.0932
	0.10	0.0937
	1.00	0.0966
	10.00	0.1630
	100.00	0.2474
Lingkaran	0.01	0.2836
	0.10	0.2749
	1.00	0.2653
	10.00	0.2459
	100.00	0.3157

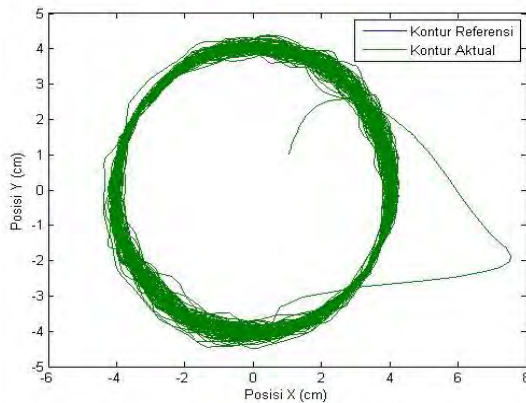
Dari pengujian dengan melakukan penambahan gangguan pada sistem dengan variasi nilai varian, terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu mengkompensasi perubahan parameter *plant* karena adanya gangguan pada sistem dan mampu menjaga kestabilan sistem.

4.3.3. Pengujian dengan Variasi Kontroler

Pengujian dengan variasi kontroler dilakukan untuk membandingkan performansi metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan metode *Cross Coupled Control* dan *Model Referenced Adaptive Control*. Pengujian ini dilakukan untuk menarik kesimpulan bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu melakukan *tracking* kontur yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode *tracking*

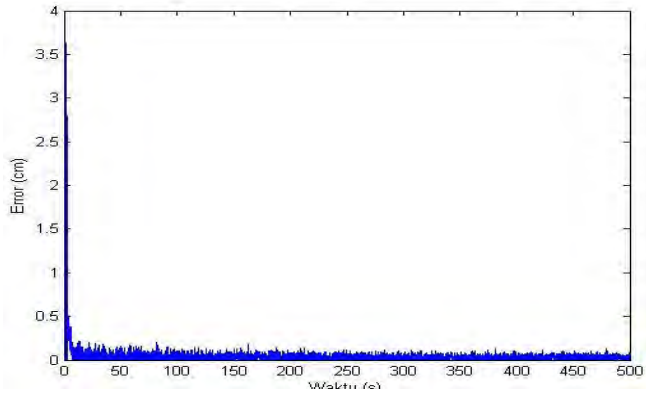
kontur CNC yang telah diteliti sebelumnya. Pengujian dilakukan pada sistem dengan penambahan gangguan. Gangguan yang diberikan pada sistem adalah *Gaussian Random Number* dengan variasi nilai varian sebesar 0,1 ; 1 ; 10.

Pengujian pertama adalah pengujian dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control*. Parameter kontroler *Cross Coupled Adaptive Control* γ_p sebesar 800 dan γ_d sebesar 20. Varian yang digunakan adalah sebesar 0,1. Respon *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.33.



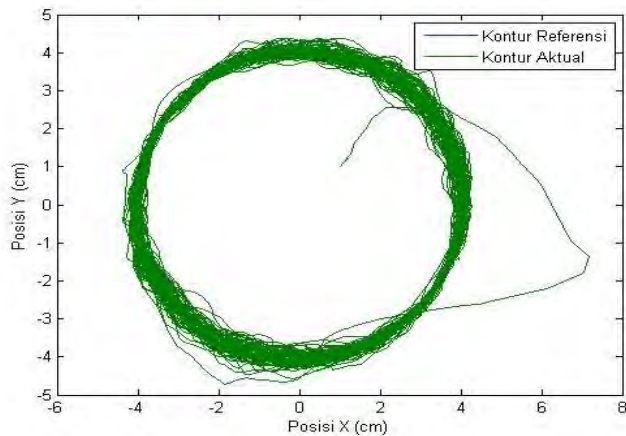
Gambar 4. 33. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 0.1

Terlihat bahwa dengan pemberian gangguan dengan varian 0,1. Metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan baik. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.34 yang menunjukkan kesalahan kontur yang terjadi. Terlihat bahwa kesalahan kontur yang terjadi mengalami penurunan nilai hingga mendekati nilai nol. Namun nilai nol tidak dapat dicapai dikarenakan adanya penambahan gangguan pada sistem.



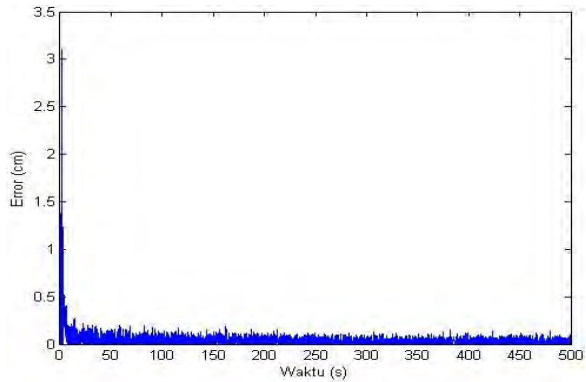
Gambar 4. 34. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 0.1

Selanjutnya akan diberikan gangguan dengan varian sebesar 1. Respon *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.35.



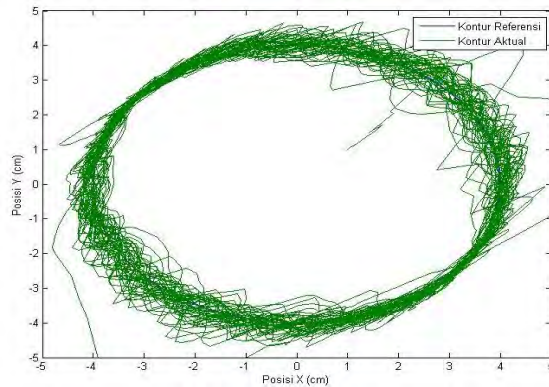
Gambar 4. 35. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 1

Terlihat bahwa dengan pemberian gangguan dengan varian 1. Metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan baik. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.36 yang menunjukkan kesalahan kontur yang terjadi.



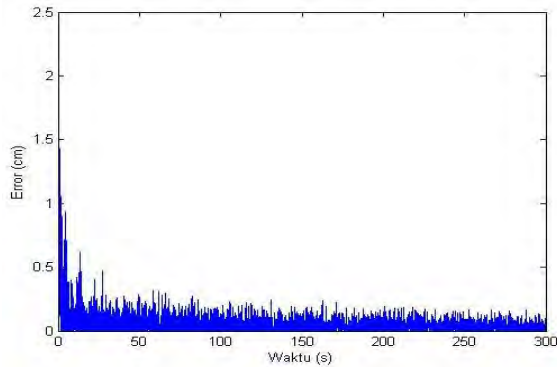
Gambar 4. 36. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 1

Selanjutnya akan ditambahkan gangguan dengan varian sebesar 10. Respon *tracking* kontur lingkaran diunjukkan pada Gambar 4.37.



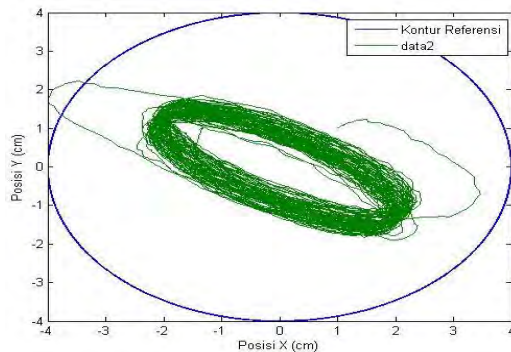
Gambar 4. 37. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 10

Terlihat bahwa dengan pemberian gangguan dengan varian 10. Metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu melakukan *tracking* kontur lingkaran dengan baik. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.38 yang menunjukkan kesalahan kontur yang terjadi.



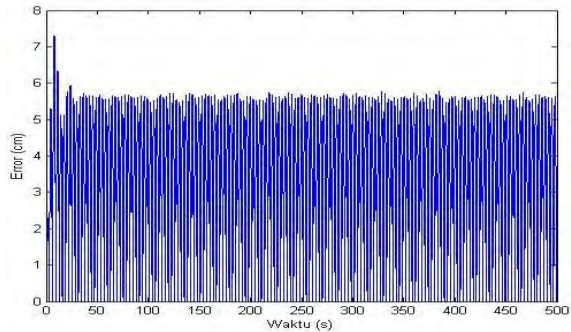
Gambar 4. 38. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 10

Pengujian kedua adalah pengujian dengan menggunakan metode *Cross Coupled Control*. Parameter kontroler *Cross Coupled Control* yang digunakan adalah K_p bernilai 1 dan K_d bernilai 1. Varian yang digunakan adalah sebesar 0,1. Respon *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.39.



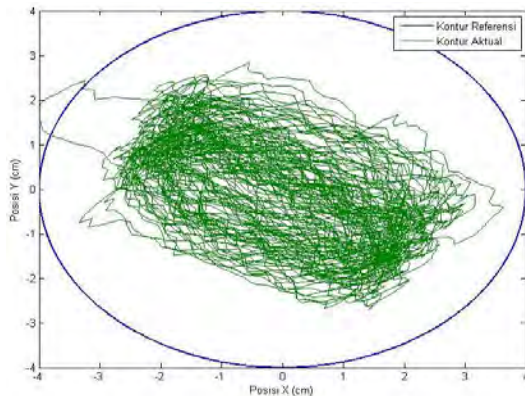
Gambar 4. 39.Tracking Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 0.1

Terlihat bahwa dengan pemberian gangguan dengan varian 0,1. Metode *Cross Coupled Control* tidak berhasil melakukan *tracking* kontur lingkaran. Sinyal kesalahan ditunjukkan pada Gambar 4.40.



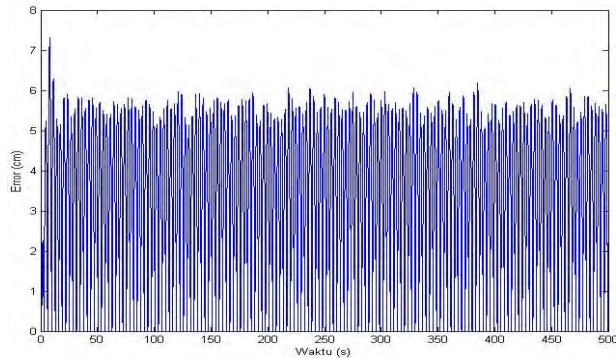
Gambar 4. 40. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 0.1

Selanjutnya akan diberikan gangguan dengan varian 1. Respon *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.41.



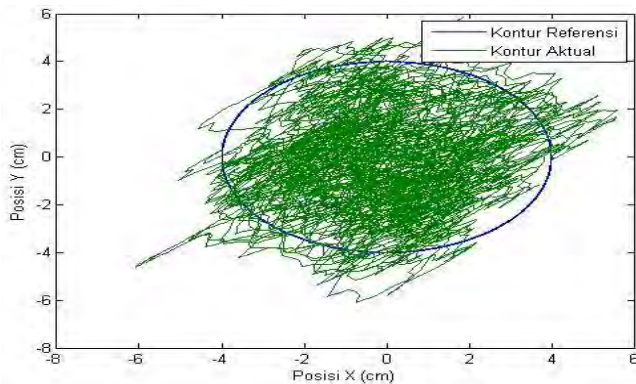
Gambar 4. 41. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 1

Terlihat bahwa dengan pemberian gangguan dengan varian 1. Metode *Cross Coupled Control* tidak berhasil melakukan *tracking* kontur lingkaran. Sinyal kesalahan ditunjukkan pada Gambar 4.42.



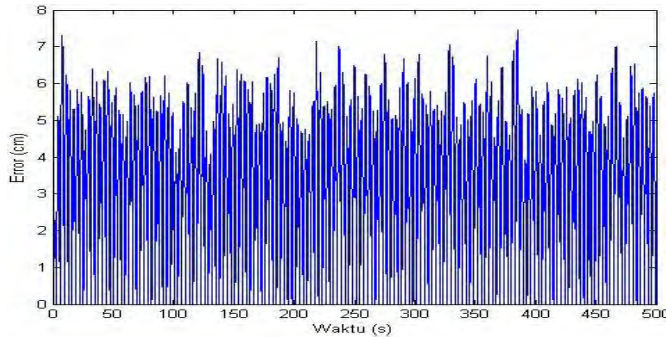
Gambar 4. 42. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 1

Selanjutnya akan diberikan gangguan dengan varian 10. Respon *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.43.



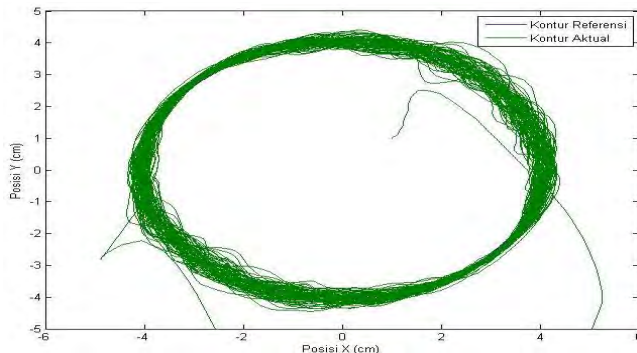
Gambar 4. 43. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 10

Terlihat bahwa dengan pemberian gangguan dengan varian 10. Metode *Cross Coupled Control* tidak berhasil melakukan *tracking* kontur lingkaran. Sinyal kesalahan ditunjukkan pada Gambar 4.44.



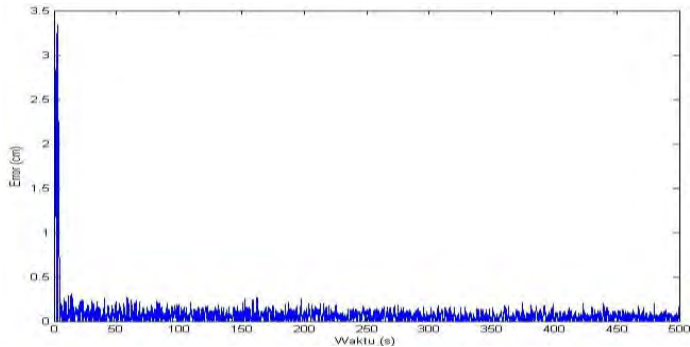
Gambar 4. 44. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 10

Pengujian ketiga adalah pengujian dengan menggunakan metode *Model Referenced Adaptive Control*. Pada pengujian ini akan digunakan parameter γ_p sebesar 800 dan γ_d sebesar 20. Varian yang digunakan adalah sebesar 0,1. Respon *tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.45.



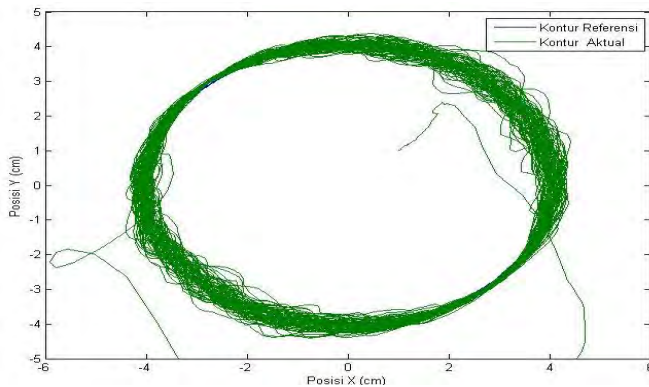
Gambar 4. 45. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Model Referenced Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 0,1

Terlihat bahwa *Model Referenced Adaptive Control* dapat melakukan *tracking* kontur lingkaran. Sinyal kesalahan dari *tracking* kontur lingkaran dengan gangguan 0,1 ditunjukkan pada Gambar 4.46.



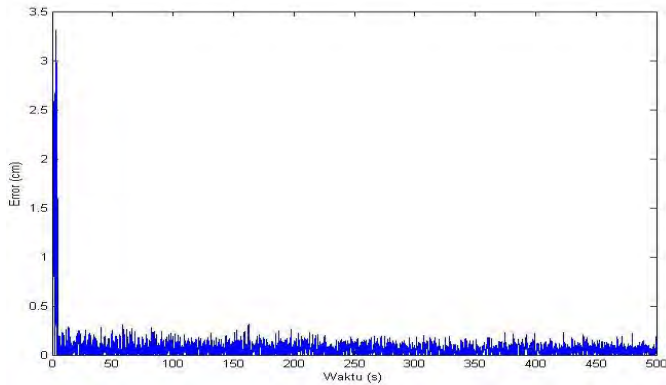
Gambar 4. 46. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 0,1

Selanjutnya akan dilakukan pemberian gangguan dengan varian sebesar 1. *Tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.47.



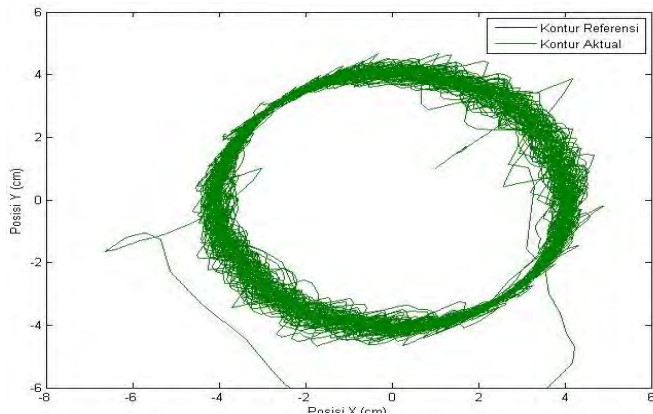
Gambar 4. 47. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Model Referenced Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 1

Terlihat bahwa *Model Referenced Adaptive Control* dapat melakukan *tracking* kontur lingkaran. Sinyal kesalahan dari *tracking* kontur lingkaran dengan gangguan 1 ditunjukkan pada Gambar 4.48.



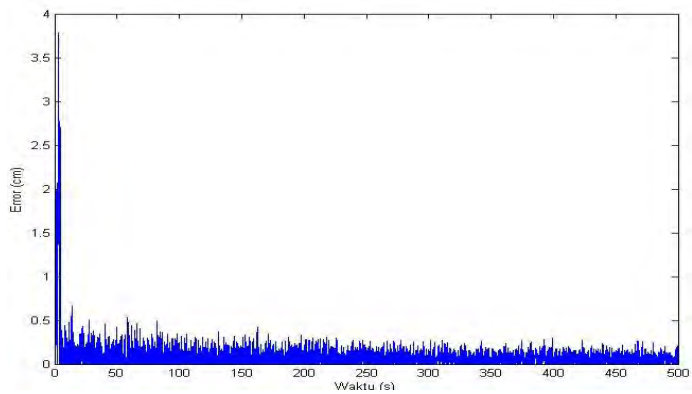
Gambar 4. 48. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 1

Selanjutnya akan dilakukan pemberian gangguan dengan varian sebesar 10. *Tracking* kontur lingkaran ditunjukkan pada Gambar 4.47.



Gambar 4. 49. *Tracking* Kontur Lingkaran dengan Metode *Model Referenced Adaptive Control* dengan Varian Gangguan 10

Terlihat bahwa *Model Referenced Adaptive Control* dapat melakukan *tracking* kontur lingkaran. Sinyal kesalahan dari *tracking* kontur lingkaran dengan gangguan 10 ditunjukkan pada Gambar 4.50.



Gambar 4. 50. Sinyal Kesalahan Pembentukan Kontur Lingkaran dengan Metode *Cross Coupled Control* dengan Varian Gangguan 10

Untuk melakukan perbandingan performansi antara metode kontrol *Cross Coupled Adaptive Control* ,*Cross Coupled Control* dan *Model Reference Adaptive Control* digunakan perhitungan nilai RMSE yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Perbandingan Nilai RMSE Pengujian dengan Variasi Metode Kontrol

Kontur	Gangguan	CCC Adaptive	CCC	MRAC
Linier	0.1	0.0354	0.0752	0.0481
	1.0	0.0475	0.2110	0.0544
	10.0	0.0694	0.6756	0.0849
Lingkaran	0.1	0.1203	3.8816	0.1661
	1.0	0.1092	3.9128	0.1566
	10.0	0.1233	3.9617	0.1858

Dari Tabel 4.3 tersebut, dapat terlihat bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* memiliki nilai RMSE yang paling kecil dalam berbagai kondisi pengujian sistem. Hal ini menunjukkan bahwa metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu meningkatkan akurasi *tracking* kontur pada mesin CNC.

4.4. Analisa Hasil Simulasi

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, dapat ditarik informasi bahwa pengaturan pembentukan kontur mesin CNC dengan menggunakan *Cross Coupled Adaptive Control* menimbulkan fenomena-fenomena yang mampu dianalisa sebagai berikut.

Pertama, *tracking* kontur CNC dengan menggunakan metode PID-MRAC sebagai kontroler tiap *axis* dapat menghasilkan respon *plant* yang mampu mengikuti respon model referensi baik dalam keadaan *plant* tanpa gangguan ataupun dengan penambahan gangguan yang merepresentasikan dinamisasi sistem. Hal ini membuktikan kemampuan metode *Cross Coupled Adaptive Control* yang mampu melakukan *tuning* parameter kontroler secara adaptif berdasarkan perubahan parameter *plant*. Hal ini disebabkan karena mekanisme *tuning* nilai parameter kontroler didasarkan pada nilai *pole* dari model referensi yang telah ditentukan. Hal ini ditunjukkan pada langkah desain metode MRAC dalam menentukan persamaan *tuning* parameter kontroler. Diharapkan respon *plant* sama dengan respon model referensi.

$$y(t) = y_m(t)$$

$$\frac{p^2(bK_d/a) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)}{p^3 + p^2\left(\frac{1+bK_d}{a}\right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)} = \frac{b_m p^2 + b_{m1} p + b_{m2}}{p^3 + a_{m1} p^2 + a_{m2} p + b_{m2}}$$

Sehingga dapat dirumuskan Persamaan (4.1)

$$\frac{bK_i}{a} = b_{m2} \dots \dots \dots (4.1a)$$

$$\frac{bK_p}{a} = a_{m2} \dots \dots \dots (4.2b)$$

$$\frac{1+bK_d}{a} = a_{m1} \dots \dots \dots (4.2c)$$

Dengan adanya penambahan gangguan pada sistem, maka memungkinkan terjadi perubahan pada nilai parameter *plant* a dan b . Namun, dengan berdasarkan pada Persamaan (23), maka memungkinkan terjadinya *tuning* parameter kontroler PID dengan tetap menyesuaikan pada spesifikasi model referensi yang ingin dicapai.

Kedua, pada proses *tracking* kontur tiap *axis*, selalu didapatkan kesalahan pada waktu awal melakukan *tracking* kontur yang diinginkan. Kesalahan ini disebabkan karena metode *Cross Coupled Adaptive Control* salah satunya tersusun atas metode Model Referenced Adaptive Control yang merupakan metode kontrol adaptif. Ciri khas dari metode adaptif adalah melakukan *tuning* parameter kontroler sedemikian rupa sehingga didapat parameter kontroler yang mampu membuat *plant* bertindak sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Kesalahan saat waktu awal pembentukan kontur dikarenakan metode *Cross Coupled Adaptive Control* membutuhkan waktu untuk mencari nilai parameter kontroler yang tepat.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa, dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Kesalahan kontur yang dipengaruhi perubahan parameter *plant* dalam melakukan *tracking* kontur dan sinkronisasi kontrol antar *axis* dapat dikompensasi dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control*.
2. Dalam melakukan mekanisme adaptasi parameter kontroler, metode *Cross Coupled Adaptive Control* dipengaruhi oleh faktor *gain* adaptasi parameter. Semakin besar nilai dari *gain* adaptasi, maka kecepatan adaptasi parameter *plant* akan semakin cepat.
3. Semakin besarnya nilai γ_p , maka respon *tracking* sistem akan semakin cepat. Hal ini ditunjukkan dari penurunan nilai RMSE pada pengujian dengan variasi perubahan parameter kontroler
4. Pada pengujian dengan variasi nilai varian gangguan, metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu melakukan *tracking* dengan baik pada saat diberikan gangguan dengan varian 0,01;0,1 ;1 dan 10 dengan nilai RMSE yang dihasilkan lebih kecil dari toleransi kesalahan sebesar 0,3.
5. Dalam melakukan *tracking* kontur, terjadi kesalahan pada awal proses *tracking*. Hal ini disebabkan adanya karakteristik adaptasi untuk melakukan *tuning* parameter kontroler agar *plant* mampu mengikuti respon model referensi.
6. Metode *Cross Coupled Adaptive Control* mampu melakukan *tracking* kontur dengan lebih baik jika dibandingkan dengan metode *Cross Coupled Control* dan *Model Referenced Adaptive Control*.

5.2. Rekomendasi

Berdasarkan hasil pengujian dan analisa dari Tugas Akhir pengaturan CNC dengan menggunakan *Cross Coupled Adaptive Control*

ini dapat dirumuskan beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

1. Pengujian dilakukan dengan beberapa fungsi alih *plant* yang berbeda. Sehingga akan mampu dianalisa dan dikembangkan metode *Cross Coupled Adaptive Control* untuk meningkatkan akurasi kontur pada berbagai mesin CNC dengan *transfer function* aktuatur *axis* yang beragam.
2. Dengan menggunakan metode *Cross Coupled Adaptive Control*, akan didapat kesalahan pada awal *tracking* kontur dikarenakan adanya karakteristik adaptif untuk mencari parameter kontroler yang tepat. Jika pada saat waktu awal dimana masih dilakukan pencarian parameter kontroler yang sesuai sudah dilakukan pemahatan pada objek, maka kesalahan pembentukan kontur akan terjadi. Oleh karena itu, diperlukan waktu jeda antara proses *tuning* parameter kontroler yang tepat dengan proses pemahatan. Dengan demikian proses pemahatan akan dilakukan pada titik pembentukan kontur yang diinginkan.

LAMPIRAN A

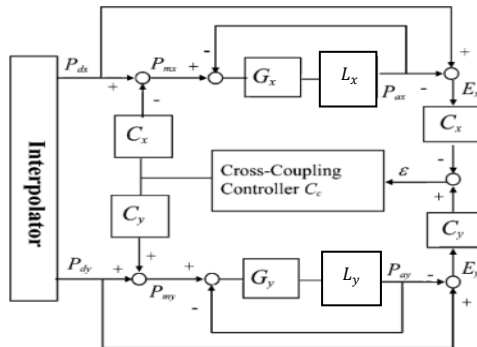
PENURUNAN PERSAMAAN CCC

Metode *Cross Coupled Control* bertugas untuk melakukan sinkronisasi kontrol antar *axis* CNC dengan cara mereduksi model kesalahan kontur. Struktur *Cross Coupled Control* merujuk pada *paper* “*A Novel Cross Coupling Control Design for Bi-Axis Motion*”. Desain dari *Cross Coupled Control* difokuskan pada pemilihan algoritma kontrol C_c untuk mereduksi kesalahan kontur. Fungsi alih dari kesalahan kontur selanjutnya akan disebut *Contour Error Transfer Function* (CETF)

Tahap perancangan *Cross Coupled Control* memiliki dua tahapan berikut :

1. Penentuan CETF

CETF diturunkan berdasarkan pada perbandingan kesalahan kontur pada sistem tanpa *couple* antar *axis* (ε_0) dengan kesalahan kontur pada system dengan *couple* antar *axis* (ε) yang ditunjukkan pada Gambar A.1 Perhitungan dilakukan pada kondisi sistem tanpa *couple* untuk mendapatkan ε_0 . Kemudian, perhitungan dilakukan pada kondisi sistem dengan *couple* untuk mendapatkan ε .

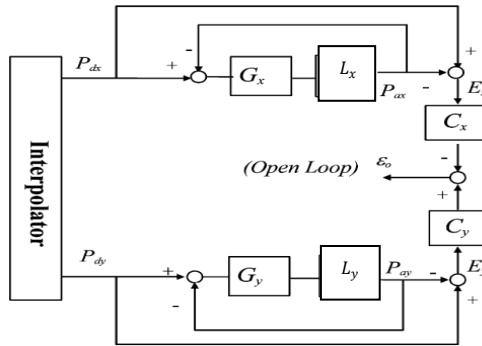


Gambar A.1 Sistem CNC dengan Metode CCC

Kesalahan kontur sistem tanpa *couple* didefinisikan pada Persamaan (A.1).

$$\varepsilon_0 = -E_x C_x + E_y C_y \dots \dots \dots (A.1)$$

Diagram blok pengaturan CNC pada sistem tanpa *couple* ditunjukkan pada Gambar A.2.



Gambar A.2 Diagram Blok Pengaturan CNC pada Sistem Tanpa *Couple*

Dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan Persamaan (A.2) dan (A.3) :

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= P_{dx} - \frac{G_x L_{vx}}{1 + G_x L_{vx}} P_{dx} \\ &= \frac{P_{dx}}{1 + G_x L_{vx}} \dots \dots \dots (A.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= P_{dy} - P_{ay} \\ &= \frac{P_{dy}}{1 + G_y L_{vy}} \dots \dots \dots (A.3) \end{aligned}$$

Substitusi Persamaan (A.2) dan (A.3) ke Persamaan (A.1), maka akan didapat persamaan kesalahan kontur pada sistem tanpa *couple* yang ditunjukkan pada Persamaan (A.4).

$$\varepsilon_0 = -E_x C_x + E_y C_y = -\frac{C_x P_{dx}}{1+G_x L_{vx}} + \frac{C_y P_{dy}}{1+G_y L_{vy}} \dots\dots\dots (A.4)$$

Sistem Dengan *Couple*

Kesalahan kontur sistem dengan *couple* didefinisikan pada Persamaan (A.5).

$$\varepsilon = -E_x C_x + E_y C_y \dots\dots\dots (A.5)$$

Kesalahan dari *axis* X dan *axis* Y didefinisikan pada Persamaan (A.6).

$$\begin{aligned} E_x &= P_{dx} - P_{ax} \\ &= \frac{P_{dx} + \varepsilon C_c C_x^2 G_x L_{vx}}{1+G_x L_{vx}} \dots\dots\dots (A.6a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_y &= P_{dy} - P_{ay} \\ &= \frac{P_{dy} + \varepsilon C_c C_y^2 G_y L_{vy}}{1+G_y L_{vy}} \dots\dots\dots (A.6b) \end{aligned}$$

Dilakukan substitusi Persamaan (A.6) ke Persamaan (A.5), sehingga didapat Persamaan (A.7)

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\frac{[C_x P_{dx} + \varepsilon C_c C_x^2 G_x L_{vx}]}{1+G_x L_{vx}} + \frac{C_y P_{dy} - \varepsilon C_c C_y^2 G_y L_{vy}}{1+G_y L_{vy}} \\ \varepsilon &= \frac{-C_x P_{dx}}{1+G_x L_{vx}} + \frac{C_y P_{dy}}{1+G_y L_{vy}} - \frac{\varepsilon C_c C_x^2 G_x L_{vx}}{1+G_x L_{vx}} - \frac{\varepsilon C_c C_y^2 G_y L_{vy}}{1+G_y L_{vy}} \\ \varepsilon \left[1 + \frac{C_c C_x^2 G_x L_{vx}}{1+G_x L_{vx}} + \frac{C_c C_y^2 G_y L_{vy}}{1+G_y L_{vy}} \right] &= \frac{-C_x P_{dx}}{1+G_x L_{vx}} + \frac{C_y P_{dy}}{1+G_y L_{vy}} \\ \varepsilon &= \frac{-(1+G_y L_{vy})C_x}{\Delta} P_{dx} + \frac{(1+G_x L_{vx})C_y}{\Delta} P_{dy} \dots\dots\dots (A.7) \end{aligned}$$

Dimana :

$$\Delta = (1 + G_x Lv_x)(1 + G_y Lv_y) + C_c C_x^2 G_x Lv_x (1 + G_y Lv_y) + C_c C_y^2 G_y Lv_y (1 + G_x Lv_x)$$

Substitusi Persamaan (A.7) ke Persamaan (A.6) maka didapatkan

$$E_x = \frac{P_{dx}}{1 + G_x Lv_x} - \frac{C_c C_x^2 G_x Lv_x (1 + G_y Lv_y)}{(1 + G_x Lv_x) \Delta} P_{dx} + \frac{C_c C_x C_y G_y Lv_y}{\Delta} P_{dy}$$

$$E_y = \frac{P_{dy}}{1 + G_y Lv_y} - \frac{C_c C_y^2 G_y Lv_y (1 + G_x Lv_x)}{(1 + G_y Lv_y) \Delta} P_{dy} + \frac{C_c C_x C_y G_x Lv_x}{\Delta} P_{dx}$$

CETF didapatkan dengan menyatakan hubungan antara ε dan ε_0 . Hubungan tersebut didapatkan dengan melihat Persamaan (A.4) dan (A.7) sehingga didapatkanlah Persamaan (A.8).

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + C_c P} \varepsilon_0 \dots \dots \dots (A.8)$$

Dimana P adalah

$$\frac{C_x^2 G_x Lv_x (1 + G_y Lv_y) + C_y^2 G_y Lv_y (1 + G_x Lv_x)}{(1 + G_x Lv_x)(1 + G_y Lv_y)} = \frac{C_x^2 G_x Lv_x}{(1 + G_x Lv_x)} + \frac{C_y^2 G_y Lv_y}{(1 + G_y Lv_y)}$$

2. Penentuan Algoritma Reduksi Kesalahan Kontur (Cc)

Tujuan dari algoritma kontrol adalah meminimumkan nilai CETF (ε). Kontur dasar mesin CNC yang tersusun atas kontur linier dan kontur lingkaran. Kontur linier menggunakan masukan *ramp* untuk tiap *axis* nya. Masukan sinyal *ramp* dapat didefinisikan pada Persamaan (A.9).

$$u_c(t) = t \dots \dots \dots (A.9a)$$

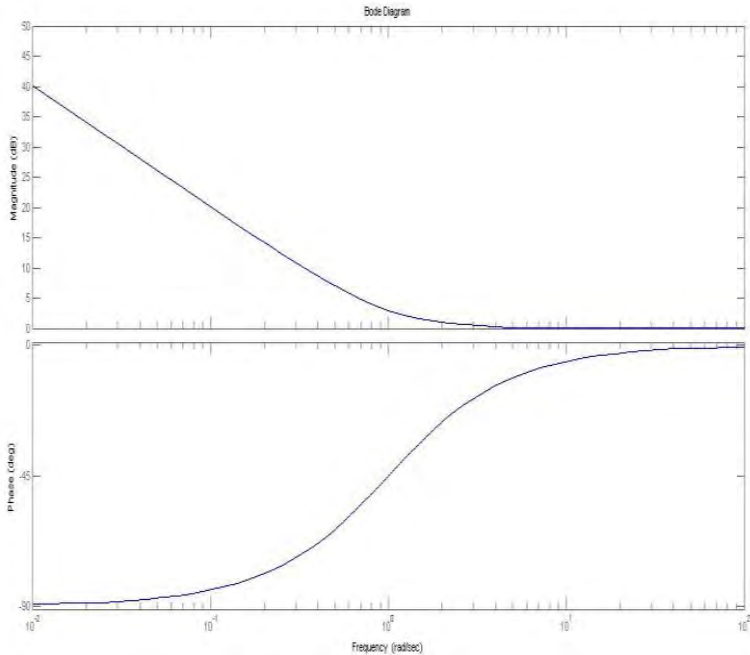
$$u_c(s) = \frac{1}{s^2} \dots \dots \dots (A.9b)$$

Sementara itu, kontur lingkaran menggunakan sinyal *sin* sebagai masukan *axis* X dan *cos* sebagai masukan *axis* Y. Dalam bentuk Laplace, sinyal masukan *sin* didefinisikan pada Persamaan (A.10), sedangkan sinyal masukan *cos* didefinisikan pada Persamaan (A.11).

$$u_c(s) = \frac{1}{s^2+1} \dots\dots\dots (A.10)$$

$$u_c(s) = \frac{s}{s^2+1} \dots\dots\dots (A.11)$$

Diagram bode sinyal masukan *ramp*, sin dan cos menunjukkan bahwa sinyal masukan tersebut memiliki nilai pada frekuensi rendah. Oleh karena itu, untuk meminimalkan persamaan CETF pada Persamaan (A.8) diperlukanlah suatu algoritma kontrol yang memiliki *gain* tinggi pada frekuensi rendah. Pada Tugas Akhir ini, akan digunakan kontroler PI yang memiliki *gain* tinggi pada frekuensi rendah. Hal ini dapat terlihat pada diagram bode kontroler PI yang ditunjukkan pada Gambar A.3



Gambar A.3 Diagram Bode Kontroler PI

LAMPIRAN B

PENURUNAN PERSAMAAN MRAC

Kontroler PID MRAC disusun berdasarkan perhitungan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p(u_c(t) - y(t)) + K_i \int_0^t (u_c(t) - y(t))dt + K_d \frac{d(u_c(t) - y(t))}{dt} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$u(t) = K_p(u_c(t) - y(t)) + \frac{K_i}{p} \cdot (u_c(t) - y(t)) + K_d \cdot p \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots\dots\dots (B.2)$$

$$y(t)[ap^3 + p^2 + bK_p p + bK_i + bK_d p^2] = u_c(t)[bK_p p + bK_i + bK_d p^2]$$

$$y(t) = \frac{[bK_p p + bK_i + bK_d p^2]}{[ap^3 + p^2 + bK_p p + bK_i + bK_d p^2]} \cdot u_c(t)$$

$$y(t) = \frac{p^2(bK_d/a) + p(bK_p/a) + bK_i}{p^3(a) + p^2(1 + bK_d/a) + p(bK_p/a) + bK_i} \cdot u_c(t)$$

$$y(t) = \frac{p^2(bK_d/a) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)}{p^3 + p^2\left(\frac{1+bK_d}{a}\right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)} \cdot u_c(t) \dots\dots\dots (B.3)$$

Dalam melakukan kontrol MRAC, diperlukan *perfect model following* dimana diinginkan respon *plant* sama dengan respon model referensi. Oleh karena itu dinyatakanlah Persamaan (B.4). Sehingga model referensi sistem dapat dinyatakan pada Persamaan (B.5).

$$y(t) = y_m(t) \dots\dots\dots (B.4)$$

$$y_m(t) = \frac{b_m p^2 + b_{m1} p + b_{m2}}{p^3 + a_{m1} p^2 + a_{m2} p + b_{m2}} \cdot u_c(t) \dots\dots\dots (B.5)$$

Metode MRAC dengan pendekatan MIT *rule* tentang perubahan parameter (θ) dinyatakan pada Persamaan (B.6)

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = \frac{\partial (y - y_m)}{\partial \theta} = \frac{\partial y}{\partial \theta} \dots\dots\dots (B.6a)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = p\theta = -\gamma \cdot e \cdot \frac{\partial e}{\partial \theta} \dots\dots\dots (B.6b)$$

$$\theta = \left(\frac{-\gamma}{p} \right) \cdot e \cdot \frac{\partial e}{\partial \theta} \dots \dots \dots (B.6c)$$

Dari Persamaan (B.3), dapatlah dicari perubahan parameter K_p dan K_d sesuai pada Persamaan (B.7).

$$\frac{\partial e}{\partial K_p} = \frac{p \cdot b}{a(p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a))} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots \dots (B.7a)$$

$$\frac{\partial e}{\partial K_i} = \frac{b}{a(p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a))} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots \dots (B.7b)$$

$$\frac{\partial e}{\partial K_d} = \frac{p^2 \cdot b}{a(p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a))} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots \dots (B.7c)$$

Dengan melakukan substitusi Persamaan (B.7) ke Persamaan (B.6c) didapatkan Persamaan (B.8) berikut :

$$K_p = \left(-\frac{\gamma_p}{p} \right) \cdot e \cdot \frac{p \cdot b}{a(p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a))} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots (B.8a)$$

$$K_i = \left(-\frac{\gamma_i}{p} \right) \cdot e \cdot \frac{b}{a(p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a))} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots (B.8b)$$

$$K_d = \left(-\frac{\gamma_d}{p} \right) \cdot e \cdot \frac{p^2 \cdot b}{a(p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a))} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots (B.8c)$$

Dengan melihat Persamaan (B.4) dan (B.5) didapatkan Persamaan (B.9) berikut

$$p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2} = (p^3 + p^2 \left(\frac{1+bK_d}{a} \right) + p(bK_p/a) + (bK_i/a)) \dots (B.9a)$$

$$\left(\frac{1+bK_d}{a} \right) = a_{m1} \dots \dots \dots (B.9b)$$

$$\frac{bK_p}{a} = a_{m2} \dots \dots \dots (B.9c)$$

$$\frac{bK_i}{a} = b_{m2} \dots \dots \dots (B.9d)$$

Dengan menotasikan :

$$\gamma_j' = \gamma_j \cdot \frac{b}{a}; j = p, i, d$$

Maka Persamaan (B.8) dapat ditulis sebagai berikut pada Persamaan (B.10) :

$$K_p = \left(-\frac{\gamma_p}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{p}{p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots \dots (B.10a)$$

$$K_i = \left(-\frac{\gamma_i}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{1}{p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots \dots (B.10b)$$

$$K_d = \left(-\frac{\gamma_d}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{p^2}{p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t)) \dots \dots \dots (B.10c)$$

Dilakukan pemilihan model referensi sistem sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (B.11).

$$G_m(s) = \frac{s^2 + 11s + 10}{s^3 + 8s^2 + 17s + 10} \dots \dots \dots (B.11)$$

Oleh karena itu, kontroler PID MRAC yang digunakan sebagai kontroler tiap *axis* adalah sebagai berikut :

$$y(t) = \frac{b}{ap^2 + p} \left[K_p (u_c(t) - y(t)) + \frac{K_i}{p} \cdot (u_c(t) - y(t)) + K_d \cdot p \cdot (u_c(t) - y(t)) \right]$$

Dimana :

$$K_p = \left(-\frac{\gamma_p}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{p}{p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t))$$

$$K_i = \left(-\frac{\gamma_i}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{1}{p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t))$$

$$K_d = \left(-\frac{\gamma_d}{p}\right) \cdot e \cdot \frac{p^2}{p^3 + a_{m1}p^2 + a_{m2} \cdot p + b_{m2}} \cdot (u_c(t) - y(t))$$

LAMPIRAN C

KETERANGAN NOTASI

a. *Cross Coupled Control*

u_c = Sinyal posisi referensi
 ε = Kesalahan kontur pada sistem dengan *couple*
 ε_0 = Kesalahan kontur pada sistem tanpa *couple*
 P_{dx} = Posisi referensi *axis* X
 P_{dy} = Posisi referensi *axis* Y
 P_{mx} = Posisi modifikasi *axis* X
 P_{my} = Posisi modifikasi *axis* Y
 G_x = Kontroler *axis* X
 G_y = Kontroler *axis* Y
 L_x = Motor *servo* AC *axis* X
 L_y = Motor *servo* AC *axis* Y
 C_x = *Gain* variabel *axis* X
 C_y = *Gain* variabel *axis* Y
 C_c = Metode reduksi kesalahan kontur

b. *Model Referenced Adaptive Control*

u = Sinyal kontrol
 u_c = Sinyal posisi referensi
 k_p = Parameter Kp
 k_i = Parameter Ki
 k_d = Parameter Kd
 y = Keluaran *plant*
 a = Parameter *plant*
 b = Parameter *plant*
 θ = Parameter kontroler
 y_m = Keluaran model referensi
 γ = *Gain* adaptasi
 γ_p = *Gain* adaptasi parameter Kp
 γ_i = *Gain* adaptasi parameter Ki
 γ_d = *Gain* adaptasi parameter Kd

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Erza Handi Satyawan dan biasa dipanggil Erza. Penulis adalah seorang mahasiswa yang berasal dari kota Surabaya dan terlahir pada tanggal 22 Juli 1992. Penulis telah menempuh pendidikan di TK Negeri Pembina Surabaya, SDN Jemurwonosari I Surabaya, SMPN 12 Surabaya dan SMAN 16 Surabaya. Saat ini penulis menempuh pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di organisasi mahasiswa UKM Robotika ITS selama 2 tahun kepengurusan sebagai Ketua. Selepas masa kepengurusannya, penulis menggagas komunitas Panti Binaan yang bertujuan untuk memandirikan panti asuhan secara finansial.

Halaman ini sengaja dikosongkan